
DIPLOMARBEIT

Matthias Rothe

**Hochleistungskopplung in
eine Photonische
Kristall-Faser**

Mittweida, 2010

Fakultät

Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik

DIPLOMARBEIT

Hochleistungskopplung in eine Photonische Kristall-Faser

Autor:

Matthias Rothe

Studiengang:

Physikalische Technik

Seminargruppe:

PT06wP1

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Döring

Zweitprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Georg Kuka

Einreichung:

Mittweida, 08. 02. 2011

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2011

Bibliografische Angaben:

Rothe Matthias:

Hochleistungskopplung in eine Photonische Kristall-Faser . - 2011. - VII, 49 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences,

Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik, Diplomarbeit, 2010

Referat

Es wird an der Umsetzung einer faserintegrierten Optik zur Einkopplung eines gepulsten Mikrochiplasers in eine photonische Kristall-Faser zur Erzeugung eines Superkontinuums gearbeitet. Momentan wird dies durch einen kommerziellen Laserstrahlkoppler realisiert.

Ziel ist es nun, dieses Bauteil durch eine an die Faser angeschmolzene Optik zu ersetzen, um so die mechanische Belastbarkeit der Laser-Faser-Kopplung zu verbessern, die Koppeleffizienz zu erhöhen und die Kosten für das endgültige Produkt zu senken. Hierbei gilt es, durch eine möglichst einfache Linsenform die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten und gleichzeitig eine hohe Koppeleffizienz zu erreichen. Im Folgenden werden relevante theoretische Grundlagen sowie technische Vorgaben erläutert, die Herangehensweise an die Problematik, sowie Lösungsvorschläge aufgezeigt. Erste Prototypen werden untersucht und ausgewertet.

Inhalt

Inhalt.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
0 Übersicht	1
0.1 Danksagung.....	1
0.2 Motivation	2
0.3 Zielsetzung	2
1 Grundlagen zur Superkontinuumerzeugung.....	3
1.1 Photonische Kristall-Fasern.....	3
1.2 Superkontinuumerzeugung in Photonischen Kristall-Fasern.....	4
2 Stand der Technik zur Einkopplung in LWL.....	5
2.1 Kopplung Sender-LWL	5
2.1.1 Berechnung des Koppelwirkungsgrades.....	6
2.2 Kommerzielle Komponenten zur Strahleinkopplung.....	9
2.2.1 Faserexterne Optiken	10
2.2.2 Faserintegrierte Optiken	12
2.3 Aufgaben bei der Einkopplung in eine PCF.....	13
3 Aufbau der Superkontinuum-Lichtquelle	14
3.1 Beschreibung der verwendeten Faser.....	14
3.2 Beschreibung des verwendeten Lasers.....	16
4 Charakterisierung einzelner Komponenten der Superkontinuumquelle.....	17
4.1 Auswertung der Messungen.....	21
5 Faserintegrierte Optik.....	25
5.1 Design der faserintegrierten Optik.....	25
5.1.1 Entwurf mittels Strahlenoptik.....	27
5.1.2 Matrixmethode (Gaußoptik).....	30

5.2	<i>Ergebnisse der Berechnungen und Auswertung.....</i>	32
5.3	<i>Fertigung der faserintegrierten Optik.....</i>	33
6	Vermessung der faserintegrierten Optik.....	39
6.1	<i>Rechnerische Aufbereitung der Messwerte.....</i>	42
7	Ausblick.....	46
8	Thesen	47
	Literatur	48
	Eidesstattliche Erklärung.....	49

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 REM-Aufnahme einer Photonischen Kristall-Faser	3
Abb. 2 Typische spektrale Leistungsdichte unterschiedlicher Weißlichtquellen am Ausgang einer 50µm Multimode-Koppelfaser	4
Abb. 3 Stirnflächenkopplung	5
Abb. 4 Kugellinse	5
Abb. 5 Halbkugel.....	6
Abb. 6 Kopplung zweier Gaußstrahlen	6
Abb. 7 Anregungswirkungsgrad eines Gaußstrahles.....	7
Abb. 8 Graphische Darstellung des Versatz-Terms.....	8
Abb. 9 Graphische Darstellung des Verkippungs-Terms	8
Abb. 10 Schnittdarstellung durch den Faserkoppler der Schäfter + Kirchhoff GmbH	10
Abb. 11 Faserkoppler der Firma Schäfter & Kirchhoff	11
Abb. 12 Verschiedenen Formen faserintegrierter Optiken.....	12
Abb. 13 Photonische Kristall-Faser unter Auflicht-Mikroskop	14
Abb. 14 Berechnete Grundmode einer idealen Photonischen Kristall-Faser	15
Abb. 15 Faserkoppler im Laboraufbau ohne Faser.....	17
Abb. 16 Strahlprofil am Ende der PCF, Faserlänge 20m	18
Abb. 17 Erzeugtes Superkontinuum am Faserende durch Einkopplung mittels Faserkoppler	19
Abb. 18 Im Laboraufbau verwendete Optik.....	19
Abb. 19 Laboraufbau zur Kopplung in die Photonische Kristall-Faser.....	20

Abb. 20 Ergebnis der Toleranzfeldmessung für x-Verschiebung.....	21
Abb. 21 Ergebnis der Toleranzfeldmessung für y-Verschiebung.....	22
Abb. 22 Ergebnis der Toleranzfeldmessung für z-Verschiebung.....	22
Abb. 23 Einkoppelte Leistung für x-Verschiebung	23
Abb. 24 Einkoppelte Leistung für y-Verschiebung	23
Abb. 25 Einkoppelte Leistung für z-Verschiebung	24
Abb. 26 Vorgehensweise bei der Berechnung.....	26
Abb. 27 Schematische Darstellung der strahlenoptischen Betrachtung	27
Abb. 28 Skizze zur Berechnung des Linsenradius	28
Abb. 29 Strahlengang durch ein lineares opt. System.....	30
Abb. 30 Schematische Darstellung der PCF und Kapillare vor dem Verschmelzungsprozess.....	33
Abb. 31 Verschmelzung ohne Unterdruck	33
Abb. 32 Halterung offen mit eingelegter Kapillare und Faser	34
Abb. 33 Skizze der Faserhalterung mit Unterdruckanschluss	34
Abb. 34 Geschlossene Halterung mit eingelegter Faser und Unterdruckanschluss an der Plasma-Splice-Station.....	35
Abb. 35 Skizze der Verschmolzenen Optik.....	36
Abb. 36 Erster Schmelzversuch mit Unterdruck	36
Abb. 37 Kollabierte Strukturen unter dem Durchlichtmikroskop	37
Abb. 38 Klebstelle von Faser und Kapillare unter dem Durchlichtmikroskop	37
Abb. 39 Optik Nr.1 unter dem Durchlichtmikroskop.....	39
Abb. 40 Optik Nr.6 unter dem Durchlichtmikroskop.....	39

Abb. 41 Spektrometrische Messung am Faserende bei Einkopplung mittels Optik_1, Faserlänge 1,5m	40
Abb. 42 Erzeugtes Spektrum am Faserende bei Einkopplung mittels Optik 6, Faserlänge 1,5m	41
Abb. 43 Aufnahme des Strahlprofils am Faserende bei Einkopplung mit Optik 6.....	41
Abb. 44 Skizze von Optik 6 mit theoretischem Strahlengang	42

Tabellenverzeichnis

Table 1 Spezifikationen Laser.....	16
------------------------------------	----

Abkürzungsverzeichnis

LWL	Lichtwellenleiter
MFD	Modenfelddurchmesser
PCF	Photonic Crystal Fiber / Photonische Kristall-Faser
REM	Rasterelektronenmikroskop

0 Übersicht

0.1 Danksagung

Ich möchte mich besonders bei Prof. Dr. rer. nat. Georg Kuka und Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Döring bedanken, die mir die Erstellung dieses Diplomthemas überhaupt ermöglichten. Ein großer Dank geht auch an Herrn Lajos Bognar, welcher die Fertigung der Linsen realisierte.

Weiterhin bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Firma fiberware, insbesondere Dipl. Ing. Torsten Hähnel und Dipl. Ing. Thomas Brabant für die Unterstützung und Beratung bei den praktischen Experimenten.

0.2 Motivation

Für eine Vielzahl von optischen Messaufgaben ist es notwendig eine Lichtquelle zu benutzen, welche über einen weiten Spektralbereich eine genügend hohe Leistungsdichte bereitstellt. Handelsübliche Lichtquellen können diese Anforderungen oft nur zu einem geringen Grad realisieren.

Superkontinuum-Lichtquellen bieten hier eine sehr breitbandige Strahlung bei gleichzeitig hoher Intensität über das gesamte Spektrum. Bisherige Quellen dieser Art sind sehr teuer und groß. Die Firma fiberware hat eine sehr kostengünstige Quelle auf Basis einer Photonischen Kristall-Faser entwickelt, welche inklusive aller benötigten Elektronik und Steuerung leicht in einem Laboraufbau unterzubringen oder auch zu transportieren ist.

Die Einkopplung des zur Superkontinuumzeugung benötigten Laserpulses in die PCF stellt allerdings sehr hohe technische Anforderungen an die verwendeten Optik und die mechanische Befestigung. Diese Optik soll noch kostengünstiger hergestellt werden und eine noch stabilere Einkopplung realisieren.

0.3 Zielsetzung

Die hier vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Analyse und Auswertung des bisherigen technischen Standes der Einkopplung eines gepulsten Mikrochip-lasers in eine Photonische Kristall-Faser und deren Vor- und Nachteile. Es wird eine Methode, deren Entwicklung und Umsetzung vorgestellt, die diese Einkopplung in allen Belangen verbessern soll.

1 Grundlagen zur Superkontinuumerzeugung

1.1 Photonische Kristall-Fasern

Als Photonische Kristall-Fasern oder PCF werden Lichtwellenleiter bezeichnet, die eine geordnete innere Struktur, meist bestehend aus Luftkapillaren, aufweisen. Diese Struktur, welche den Mantel der Faser darstellt, weist immer eine Symmetrie ähnlich dem Gitter in einem Kristall auf.

Der Lichtleitmechanismus basiert einerseits auf dem durch die in den Strukturen befindliche Luft herabgesetzten mittleren Brechungsindex des Mantels gegenüber dem des Kerns, andererseits bilden die Strukturen aufgrund ihrer Periodizität für die zu führende Strahlung eine optische Bandlücke, analog zur elektronischen Bandlücke in der Halbleitertechnik, aus. Dies geschieht auf Grund der mehrfachen Streuung und Reflektion an diesen periodischen Strukturen, in welchen sich Licht bestimmter Wellenlängen nicht ausbreiten kann. Somit wird die Strahlung, sobald sie einmal in den Kern eingekoppelt wurde, auch nur in diesem geführt.

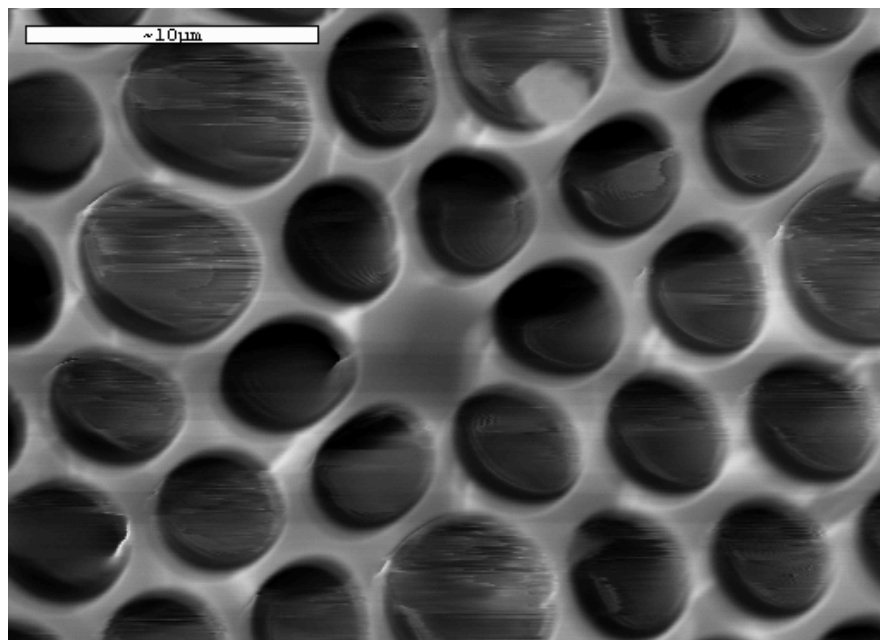


Abb. 1 REM-Aufnahme einer Photonischen Kristall-Faser

1.2 Superkontinuumzeugung in Photonischen Kristall-Fasern

Unter dem erstmals von Alfano und Shapiro beschriebenen Superkontinuum versteht man extrem breitbandige Strahlung (ca. 400nm bis 1600nm), erzeugt durch die spektrale Verbreiterung eines monochromatischen Laserpulses hoher Intensität in einem stark nichtlinearen optischen Medium. Eingesetzt werden üblicherweise Photonische Kristall-Fasern (photonic crystal fibers, PCF) oder dünn ausgezogene Glasfasern (tapered fibers). Die spektrale Verbreiterung wird in der Regel durch die Überlagerung mehrerer nichtlinear optischer Effekte wie Selbstphasenmodulation, stimulierte Ramanstreuung, Vierwellenmischung und Solitonenzerfälle verursacht. Die spektrale Leistungsdichte von Superkontinuumlichtquellen ist signifikant höher als die anderer Weißlichtquellen.

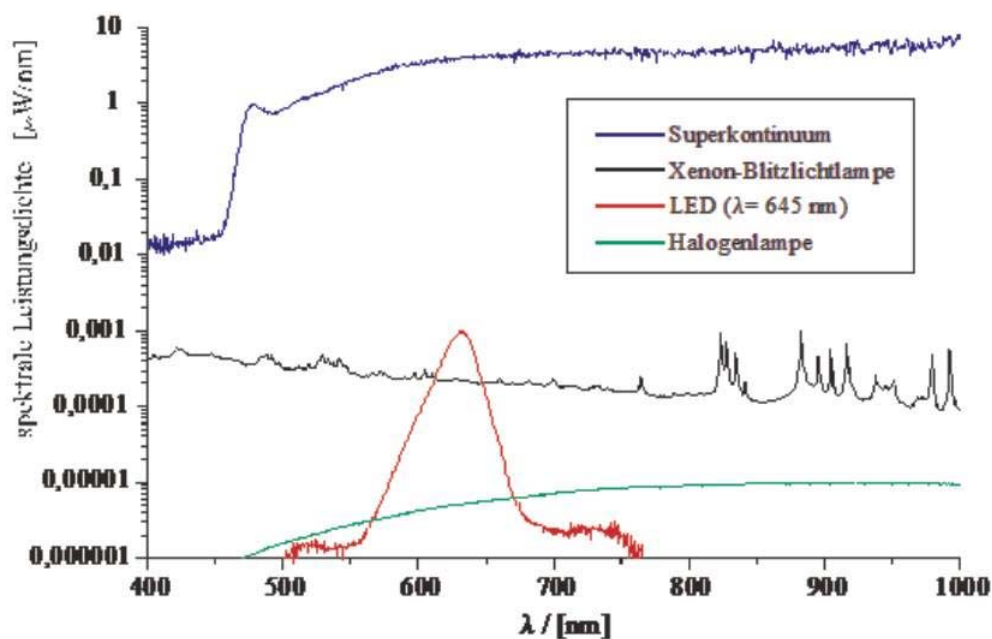


Abb. 2 Typische spektrale Leistungsdichte unterschiedlicher Weißlichtquellen am Ausgang einer 50µm Multimode-Koppelfaser.

[1]

2 Stand der Technik zur Einkopplung in LWL

In diesem Kapitel wird die prinzipielle Kopplung von einem optischen Sender und einem LWL erläutert und kurz die theoretischen Berechnungen dazu aufgezeigt. Im Weiteren werden kommerziell erhältliche Komponenten für diesen Zweck vorgestellt.

2.1 Kopplung Sender-LWL

Eine Kopplung mit bestmöglichem Wirkungsgrad erfordert eine Anpassung von Orts- und Winkelbereich des sendenden Elements an den Akzeptanzbereich des empfangenden Elements, also eine Anpassung der Wellenfelder. Diese Anpassung und damit die Kopplung erfolgt meist über eine Optik. Selten erfolgt eine direkte Kopplung.

Einfache Koppelanordnungen (links: Kantenemitter; rechts: LWL)

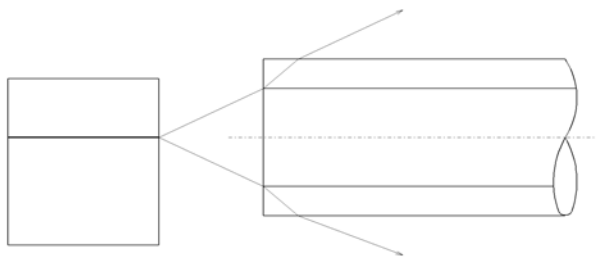


Abb. 3 Stirnflächenkopplung

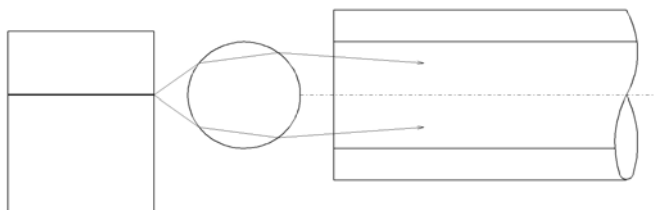


Abb. 4 Kugellinse

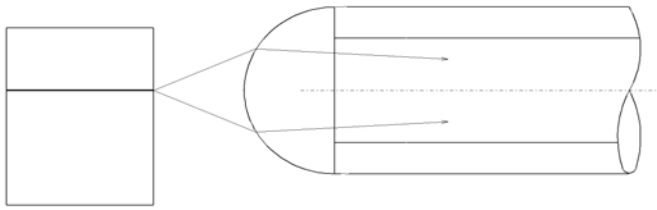


Abb. 5 Halbkugel

[2]

2.1.1 Berechnung des Koppelwirkungsgrades

Für die grundlegende Berechnung einer Kopplung werden Gaußstrahlen verwendet. Für diese Berechnung wird ein Gaußstrahl aus einem Medium e behandelt, der an der Verbindung zu einem anderen Medium a wieder einen Gaußstrahl anregt. Zum Beispiel kann man so vereinfacht die Kopplung einer Singlemode-Faser an einen Laser beschreiben.

[3]

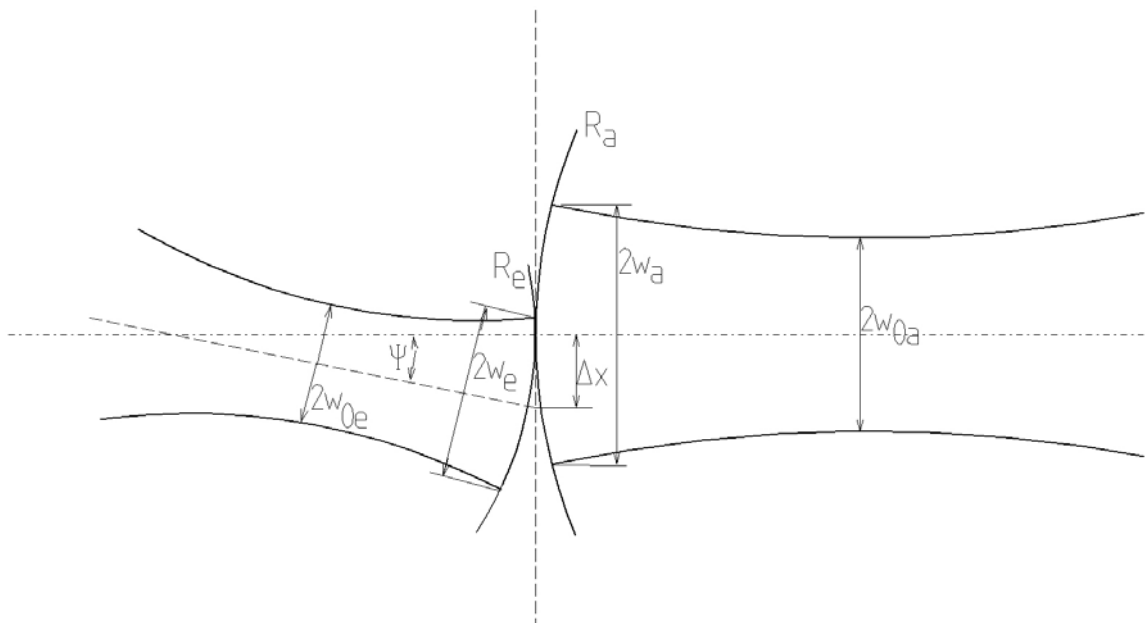


Abb. 6 Kopplung zweier Gaußstrahlen

[3, Bild 12.2]

Der Koppelwirkungsgrad η einer solchen Kopplung errechnet sich allgemein aus:

$$\eta = \frac{4}{\left(\frac{\omega_a}{\omega_e} + \frac{\omega_e}{\omega_a}\right)^2 + \left(\frac{\pi\omega_e\omega_a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_e}\right)^2} - \frac{8(\omega_{0a}\omega_{0e}\Delta x)^2}{(\omega_{0a}^2 + \omega_{0e}^2)^3} - \frac{k^2\psi^2}{2}(\omega_e^2 + \omega_a^2)$$

Mit ω - Fleckradius an Verbindungsebene

ω_0 - Strahltaillenradius

R - Phasenfrontradius

Δx - Versatz

Ψ - Verkippungswinkel

k - Wellenzahl

[3, 12.7]

Ohne Verkippung, $\psi = 0$ und Versatz, $\Delta x = 0$ beschreibt der erste Term der Gleichung allein den Anregungswirkungsgrad. Bild 7 zeigt diesen Term für verschiedene

Werte des Parameters $\sigma = \pi \left[\frac{\omega_a^2}{\lambda R_a} \left(\frac{R_a}{R_e} - 1 \right) \right]$ in Abhängigkeit von $\frac{\omega_e}{\omega_a}$.

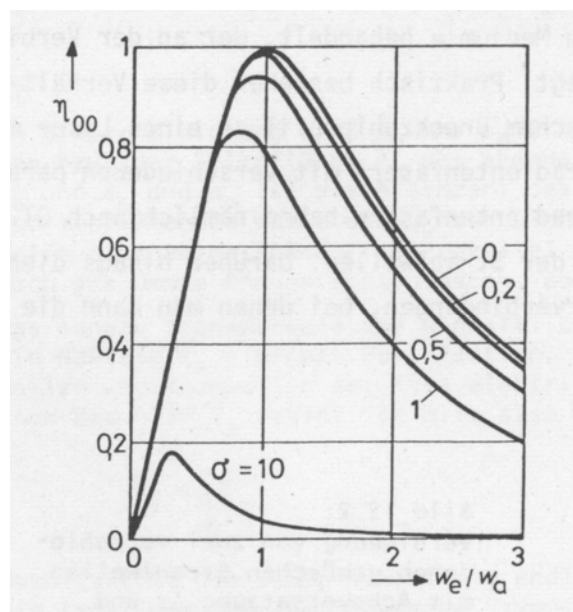
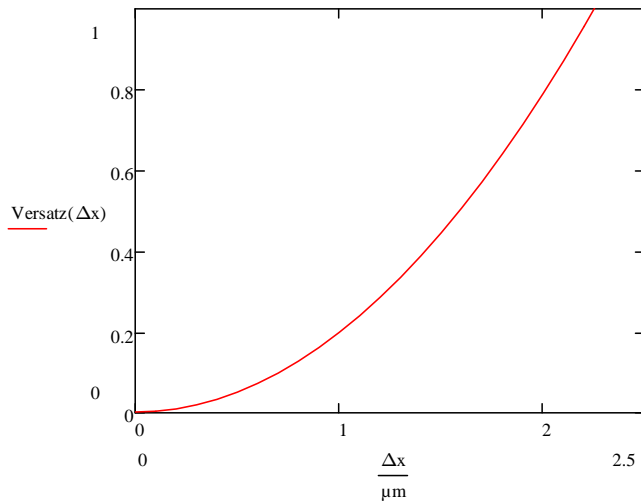


Abb. 7 Anregungswirkungsgrad eines Gaußstrahles

[3, Bild 12.3]

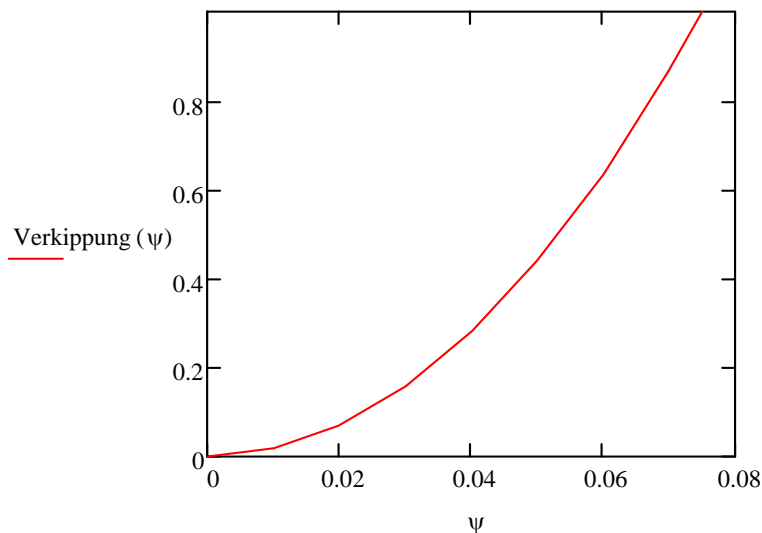
Der Einfluss des Versatz-Terms auf den Gesamt-Koppelwirkungsgrad ist quadratisch in Δx . In Abbildung 8 wurden die theoretischen Parameter der von uns verwendeten Kopplung berücksichtigt.



$$\text{Versatz}(\Delta x) := \frac{8 \cdot (\omega_{0a} \cdot \omega_{0e} \cdot \Delta x)^2}{(\omega_{0a}^2 + \omega_{0e}^2)^3}$$

Abb. 8 Graphische Darstellung des Versatz-Terms

Der Verkippungs-Term zeigt analog zum Versatz eine quadratische Abhängigkeit. In Abbildung 9 wurden die theoretischen Parameter der von uns verwendeten Optik berücksichtigt.



$$\text{Verkippung}(\psi) := \frac{k^2 \cdot \psi^2}{2} \cdot (\omega_e^2 + \omega_a^2)$$

Abb. 9 Graphische Darstellung des Verkippungs-Terms

2.2 Kommerzielle Komponenten zur Strahleinkopplung

Gängige Methoden zur Strahleinkopplung in LWL können grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Einkopplung mittels faserechter Optiken
- Einkopplung mittels fasereintegrierter Optiken

In die erste Gruppe fällt auch der bislang verbaute Strahlkoppler, dessen Aufbau stellvertretend für die Kategorie erläutert werden soll.

Die fasereintegrierten Optiken zeichnen sich durch ihre Vielfältigkeit aus, da hier die Möglichkeiten zur Justage nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen und für jede Anwendung, Faser und Strahlquelle eigens eine Optik entworfen werden muss.

2.2.1 Faserexterne Optiken

Die Bauweisen faserexterner Optiken reichen von einfachen Zylinderlinsen bis hin zu komplexen und justierbaren Faserkopplern. Letztere werden hauptsächlich wegen ihrer Justierbarkeit und damit der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten verwendet. Faserexterne Faserkoppler sind je nach Aufbau für einen breiteren Einsatzzweck konzipiert. Durch diverse Justagemöglichkeiten können sie auf verschiedenste Fasertypen, Anwendungen und Strahlquellen eingerichtet werden. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die Verwendung standardisierter Anschlüsse für die Fasern und zum Teil auch für die Strahlquellen.

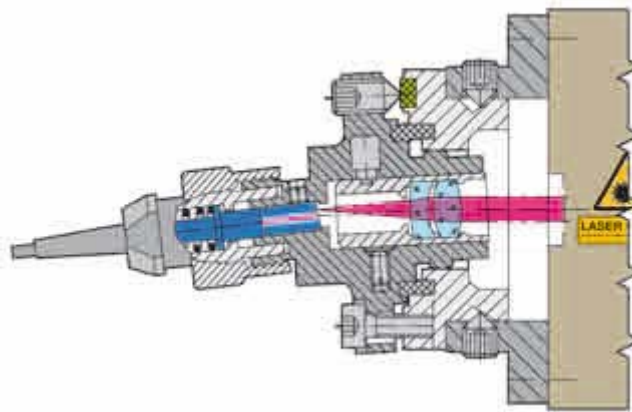


Abb. 10 Schnittdarstellung durch den Faserkoppler der Schäfter + Kirchhoff GmbH

[5]

Prinzipiell besteht der Aufbau eines Faserkopplers aus einzelnen Linsen oder Linsensystemen und der Faserhalterung gefasst in einem Gehäuse, welches in der Regel direkt an die Strahlquelle angebracht werden kann. Es steht eine Vielzahl von Linsensystemen und Beschichtungen dieser Systeme zur Auswahl, um eine bestmögliche Anpassung an Strahlquelle und Faser zu erreichen. Durch hochpräzise Optiken und die feinmechanische Justage erreicht der Faserkoppler der Firma Schäfter & Kirchhoff die geforderten Genauigkeiten und Stabilitäten.

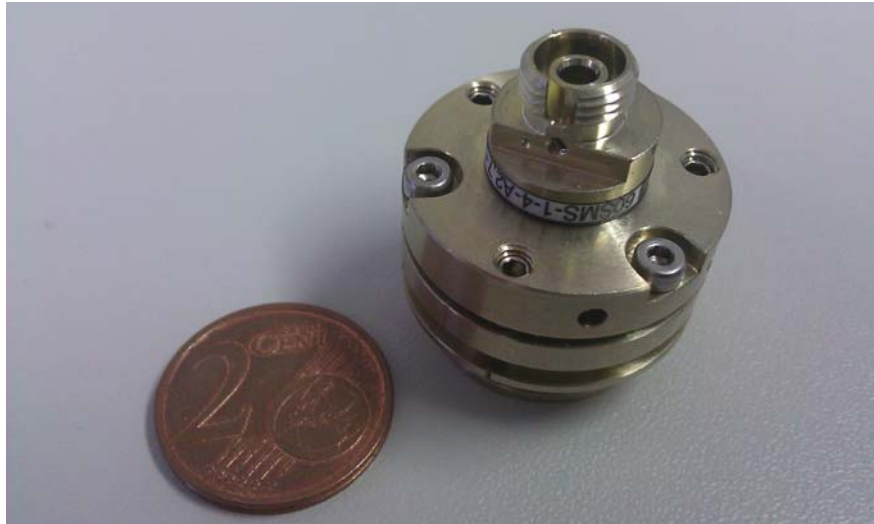


Abb. 11 Faserkoppler der Firma Schäfter & Kirchhoff

Abbildung 11 zeigt den Faserkoppler im Größenvergleich. Der Standard-Stecker ist in dieser Variante um 8° verkippt, um Rückreflexionen in die Strahlquelle zu vermeiden. Die Optiken sind als Asphären ausgeführt um Abbildungsfehler zu minimieren und so die geforderten Eigenschaften zu erfüllen.

2.2.2 Faserintegrierte Optiken

Da bei den faserintegrierten Optiken die Justage bestenfalls nur über die Positionierung zur Strahlquelle erfolgen kann und somit sehr beschränkt ist, muss für jede Art von Strahlquelle, Faser und Anwendung eine eigene Form der Optik entworfen werden, um die Kopplung zu optimieren.

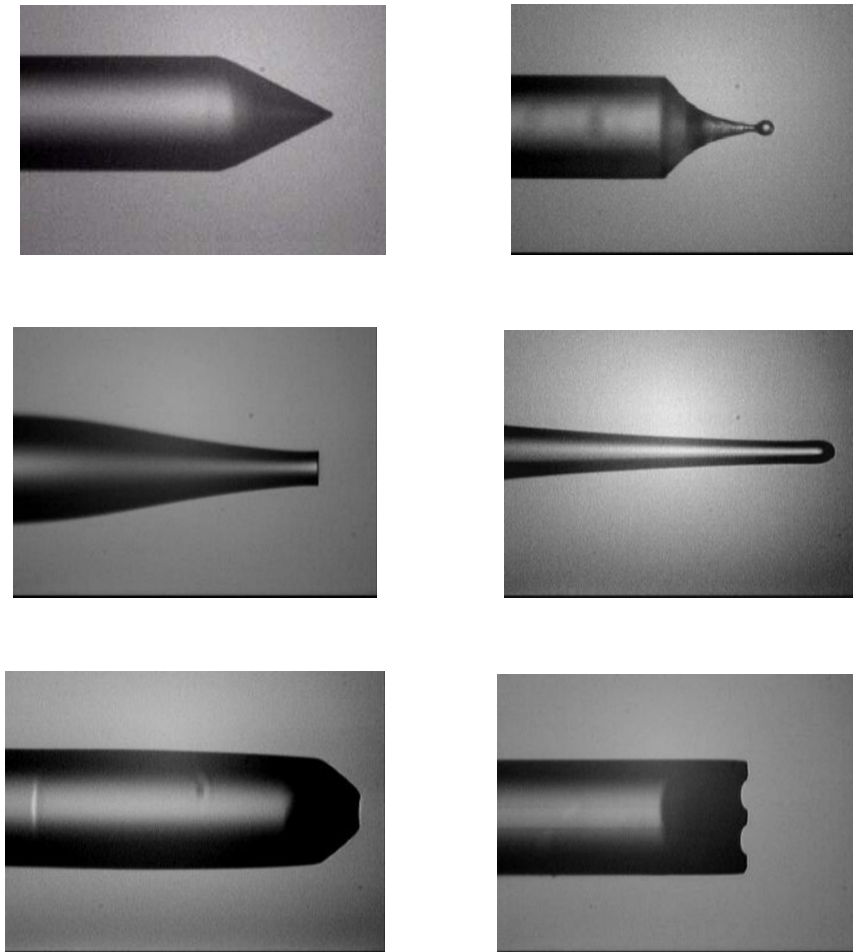


Abb. 12 Verschiedenen Formen faserintegrierter Optiken

[6]

Unabhängig von Größe und Form können auch die faserintegrierten Optiken mit Anti-Reflex-Schichten versehen werden, um die Einkopplung zu verbessern. Anwendung finden sie zum Beispiel in fasergekoppelten Laserdioden oder medizinischen Produkten, da die integrierte Bauform kleinste Baugruppen ermöglicht.

2.3 Aufgaben bei der Einkopplung in eine PCF

Die Justage beim Einkoppeln in eine PCF mittels externer Optik gestaltet sich meist sehr schwierig und zeitaufwändig, da nicht nur der Kern der Faser, sondern auch die Strukturen, wenn auch nur auf Wegstrecken von wenigen Metern, lichtleitend sind. Erschwerend kommt hinzu, dass beim Konfektionieren einer PCF, d.h. beim Einbringen der Faser in einen Stecker und Politur der Stirnfläche, die Faser nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand zentrisch im Stecker einzufassen ist. Dies resultiert aus der Stirnflächenversiegelung, welche ein Verschmelzen der Strukturen am Ende der PCF beinhaltet. Dadurch schwindet der Außendurchmesser der Faser an dieser Stelle auf deutlich unter $125\mu\text{m}$. Durch die kurze effektive Faserführung im Stecker von 0,1mm bis 0,2mm kann sich beim Einkleben der PCF diese unter Umständen unkontrollierbar an den Rand der Faserführung des Steckers legen, wodurch die Position des Kerns nicht nachvollziehbar von der optischen Achse abweichen kann. Dies ist nur zu verhindern, indem man Verschmelzungszone sehr klein ausführt, so dass die PCF an der Stelle der noch nicht kollabierten Strukturen in die Faserführung greift und sich damit zentriert.

Bei der Hochleistungskopplung kommt erschwerend hinzu, dass durch das Abrastern der Stirnfläche der Faser mit dem fokussierten Laserstrahl auf der Suche nach dem Kern diese Oberfläche zerstört werden kann. Die hohen Pulsspitzenleistungen bei dem hier verwendeten Laser von $>12\text{kW}$ können zu Ablationen von Faser- und Steckermaterial führen, welche sich ihrerseits auf der Linse des Strahlkopplers absetzen und diesen unbrauchbar machen können.

3 Aufbau der Superkontinuum-Lichtquelle

Wie in den Grundlagen zur Superkontinuum-erzeugung schon kurz beschrieben, wird in der Superkontinuum-Lichtquelle eine sehr breitbandige Strahlung durch nichtlineare optische Effekte in einer Photonischen Kristall-Faser erzeugt. Die hierfür verwendeten Komponenten sollen im folgenden Kapitel beschrieben werden. Die Optik zur Einkopplung wurde bereits im Kapitel 2.2.1 hinreichend beschrieben.

3.1 Beschreibung der verwendeten Faser

Bei der in der Superkontinuum-Lichtquelle verbauten Faser handelt es sich um eine Photonische Kristall-Faser mit einem Außendurchmesser von $125\mu\text{m}$ und einem Modenfelddurchmesser von $4,5\mu\text{m}$. Die Strukturen bestehen aus Luftkapillaren, welche in 8 Ringen hexagonal um den Kern angeordnet sind. Die Faser erreicht eine Numerische Apertur von 0,23.

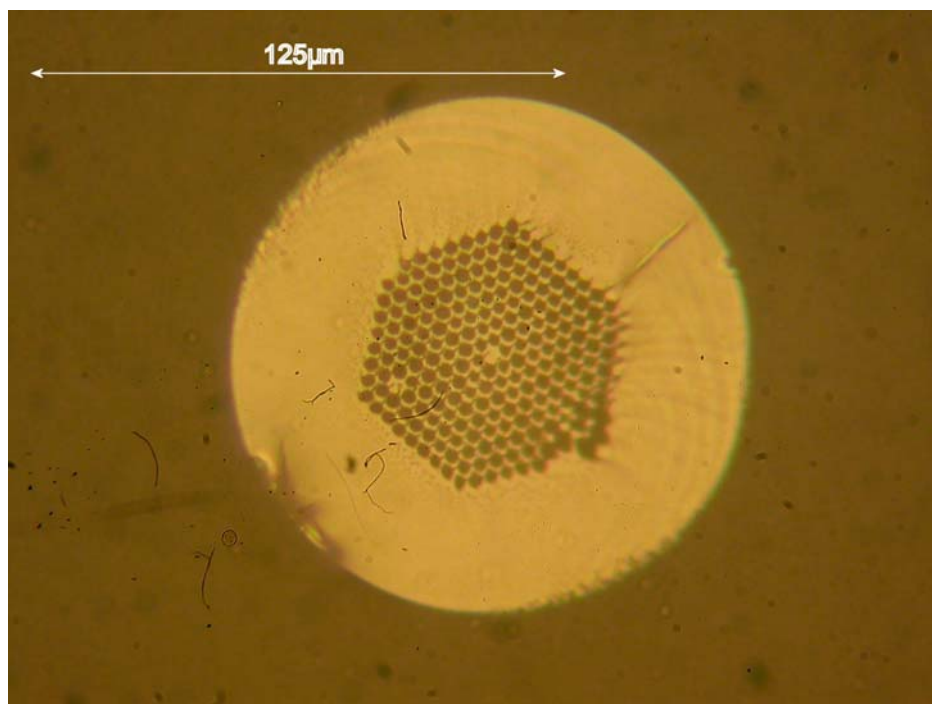


Abb. 13 Photonische Kristall-Faser unter Auflicht-Mikroskop

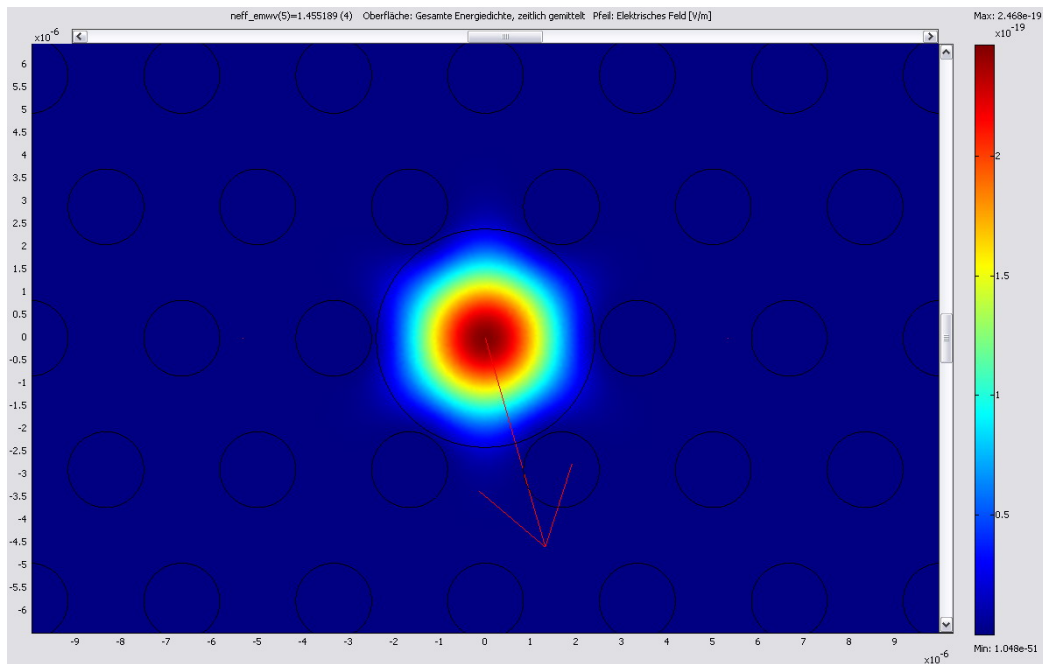


Abb. 14 Berechnete Grundmode einer idealen Photonischen Kristall-Faser ¹

In Abbildung 14 ist die leicht sechseckige Form der Mode zu erkennen, welche durch die hexagonal angeordnete Kapillarstruktur zu erklären ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass nur ein Bruchteil der Energie außerhalb des eingezeichneten Kreises, welcher den theoretischen Kerndurchmesser darstellt, liegt. Somit könnte durch eine Anpassung eines kreisrunden Laserstahls an diese Sechseckform nur eine geringe Verbesserung der Koppleffizienz erreicht werden.

¹ Mit FEM berechnete Grundmode eines LWL-Models [„Design von Photonischen Kristallfasern“ von Dipl. Ing. Thorsten Hähnel, Mittweida 2006]

3.2 Beschreibung des verwendeten Lasers

Der in der Superkontinuum-Lichtquelle verbaute Laser ist ein gepulster Mikrochip-laser mit folgenden optischen Spezifikationen:

		Teem Photonics MNP - 06E - 000
Techn. Daten	Wellenlänge	1064nm
	Pulsenergie	>6µJ
	Pulsspitzenleistung	>10kW
	Max. Repititionsrate	10kHz
	Pulsdauer	0,4 – 0,8ns
	Leistungsstabilität	< ± 3%
Opt. Daten	Mode	TEM ₀₀
	Strahlprofil	Gauß; M ² =1,35
	Strahldivergenz	11mrad horizontal 12mrad vertikal
	Strahldurchmesser	300µm horizontal
	an der Austrittsfläche	330µm vertikal

Table 1 Spezifikationen des verwendeten Lasers

4 Charakterisierung einzelner Komponenten der Superkontinuumquelle

Zur genaueren Charakterisierung der Optik und um Messwerte zur Vergleichbarkeit zu erhalten, wurde folgender Messaufbau verwendet:

Die Optik wurde in einen x-y-Versteller eingebracht, um sie zum Laser ausrichten zu können. Zur Messung der eingekoppelten Leistung wurde am Ende der zu vermessenden Faser ein Leistungsmesskopf mittels Faserstecker angebracht.



Abb. 15 Faserkoppler im Laboraufbau ohne Faser

Die Grobjustage erfolgt mit einer Gradientenindexfaser mit einem Kerndurchmesser von $50\mu\text{m}$. Hierbei wurde ein Koppelgrad von 95% erreicht.

Zur Feinjustage wurde eine Standard Singlemode-Faser mit einem Kerndurchmesser von $8\mu\text{m}$ verwendet, wobei nach hinreichend aufwendiger Justage ein Koppelgrad von 90% erreicht werden konnte.

Nach dem Ersatz der Justagefaser durch die Photonische Kristall-Faser wurden ohne Nachjustieren 95% der Leistung geführt und am Leistungsmesskopf gemessen.

Zudem ergab sich am Faserausgang kein verwertbares Strahlprofil, was den Schluss nahe liegen lässt, dass nicht in den Kern der PCF, sondern in die Strukturen eingekoppelt wurde. Dies bestätigte die Aussage unter 2.3, wonach sich die PCF nicht zentrisch im Stecker befand und nicht nur der Kern der Faser, sondern auch die Strukturen die Strahlung leiten können. Nach weiterer Justage konnte in den Kern eingekoppelt werden.

Der unter 3.2 beschriebene und für die Messungen verwendete Laser hat eine mittlere Leistung von 65mW bis 75 mW. Die Ausrichtung des Kopplers zum Laser hat entscheidenden Einfluss auf die Verluste im Koppler. Nach Optimierung der Ausrichtung konnten die Verluste im Koppler auf 5% minimiert werden. Bei bestmöglicher Justage konnte ein Koppelgrad von 60% erreicht werden. Abbildung 16 zeigt das Strahlprofil am Ende der Photonischen Kristall-Faser. Abbildung 17 zeigt einen Teil des in der Faser erzeugten Spektrums.



Abb. 16 Strahlprofil am Ende der PCF, Faserlänge 20m ²

² Aufnahme durch Dipl. Ing. Tobias Baselt (Westfälische Hochschule Zwickau)

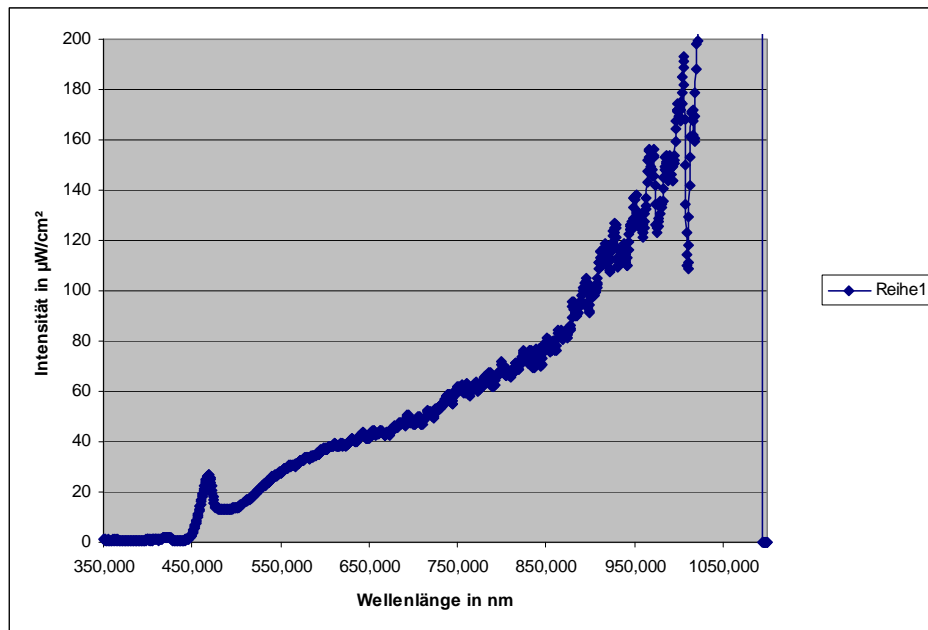


Abb. 17 Erzeugtes Superkontinuum am Faserende durch Einkopplung mittels Faserkoppler

Um eine verwertbare Aussage über die Stabilität der Kopplung treffen zu können, muss der Aufbau durch einen Laboraufbau mit hochpräzisem x-y-z-Versteller ersetzt werden, da nur so die genaue Relativverschiebung zwischen Linse und Faser ermittelt werden kann. Die Fokussierung des Laserstrahls erfolgt analog zum Faserkoppler mittels asphärischer Optik, welche sich allerdings in Größe und Brennweite von dem Linsensystem des Kopplers unterscheidet. Dies ist mit der für den Laboraufbau gewählten Strahlführung und den sich damit ergebenden Strahleigenschaften an der Linse zu erklären. Weiterhin konnte mittels Graukeil die Laserleistung an der Linse reduziert werden. Dieser Graukeil wies Transmissionen von 1-80% auf, so dass die eine für die Justage notwendige Abschwächung, wegen der unter 2.3 genannten Probleme zu realisieren war.



Brennweite	NA	AR-Beschichtung
f=8mm	0,5	600-1050nm

Abb. 18 Im Laboraufbau verwendete Optik

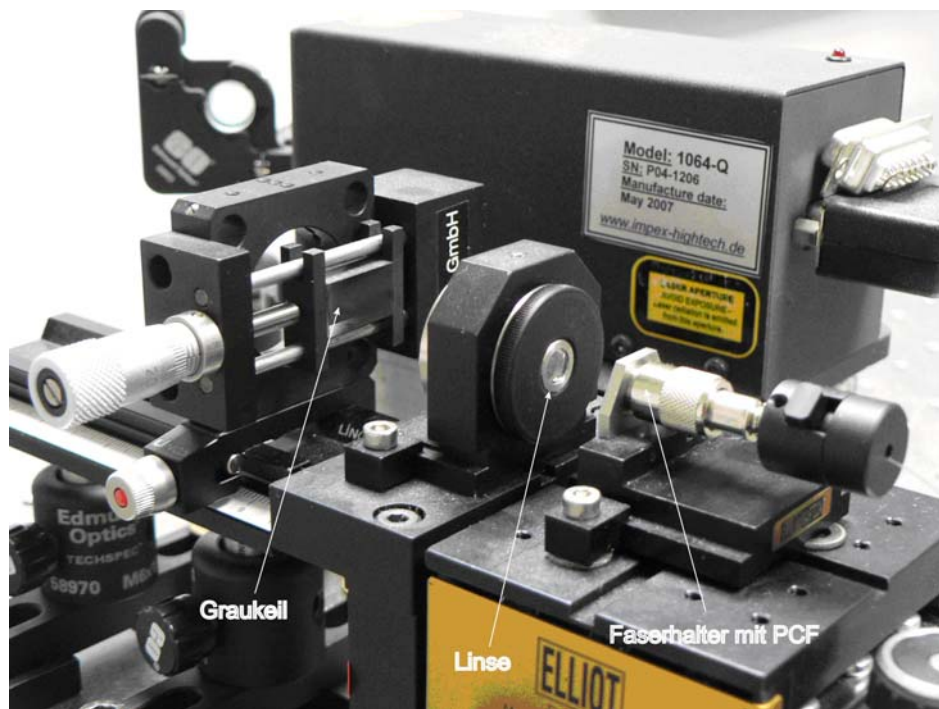


Abb. 19 Laboraufbau zur Kopplung in die Photonische Kristall-Faser

Auch bei diesem Aufbau muss zuerst die Ausrichtung der Optik optimiert werden. Danach kann, analog zum Koppler, mit der Justage mittels Fasern mit immer geringer werdendem Kerndurchmesser begonnen werden. Auch hier wurden Kopplungsgrade in die Photonische Kristall-Faser von 60% erreicht, so dass dieser Laboraufbau als gute Referenz zu dem Faserkoppler gesehen werden kann.

Die Stabilität der Einkopplung wurde auf Grund der lichtleitenden Eigenschaften der Strukturen nicht über die in der Faser geführten Leistung, sondern mittels Relativverschiebung zwischen Linse und Faser und deren Einfluss auf das in der Faser erzeugten Spektrum untersucht.

Hierbei wurde nach genauer Justage jeweils in einer Achse die Optik zur Faser soweit verstellt, bis kein Superkontinuum mehr erzeugt wurde. Danach wurde in für jede Achse passenden Schritten verstellt und jeweils das erzeugte Spektrum aufgenommen.

4.1 Auswertung der Messungen

Mit Hilfe des unter 4. beschriebenen Laboraufbaus war es möglich, die Veränderung des erzeugten Superkontinuums abhängig von der Relativverschiebung der Linse zum Laser aufzunehmen.

Es ist leicht zu erkennen, dass eine laterale Verschiebung auf Grund der vorhandenen Rayleighlänge des fokussierten Strahls von theoretisch rund $60\mu\text{m}$ im Linsenkörper bei Weitem nicht so einen großen Einfluss auf die Superkontinuumerzeugung hat wie eine radiale Verschiebung. Die radiale Verschiebung ist demnach derart empfindlich, dass kleinste Verschiebungen der im Laboraufbau freistehenden Faser zu einer drastischen Veränderung des erzeugten Superkontinuums führen.

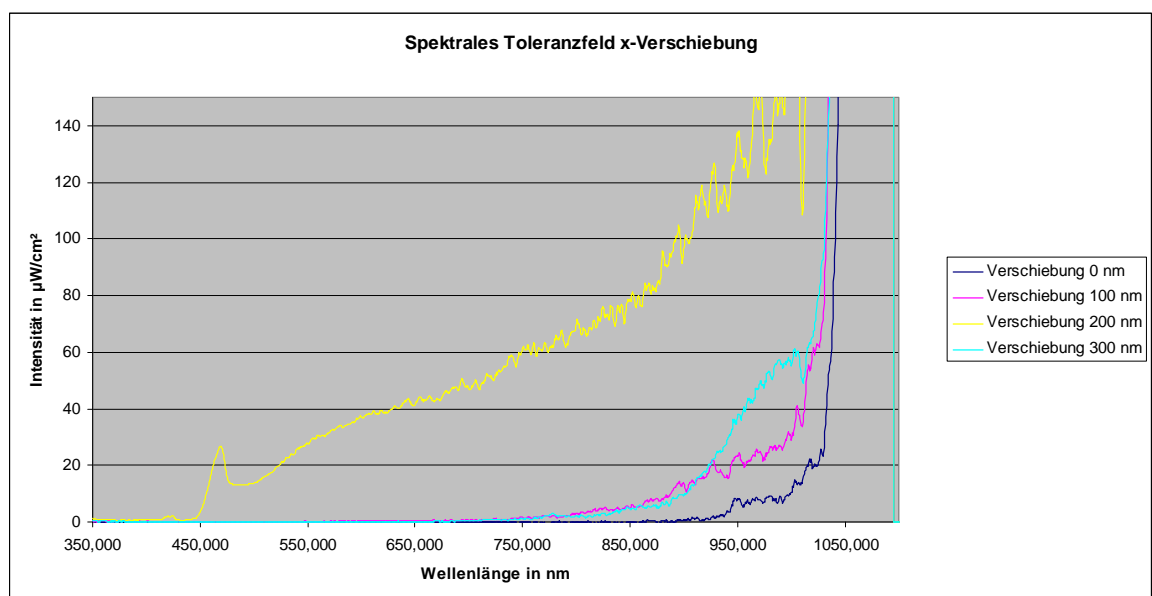


Abb. 20 Ergebnis der Toleranzfeldmessung für x-Verschiebung

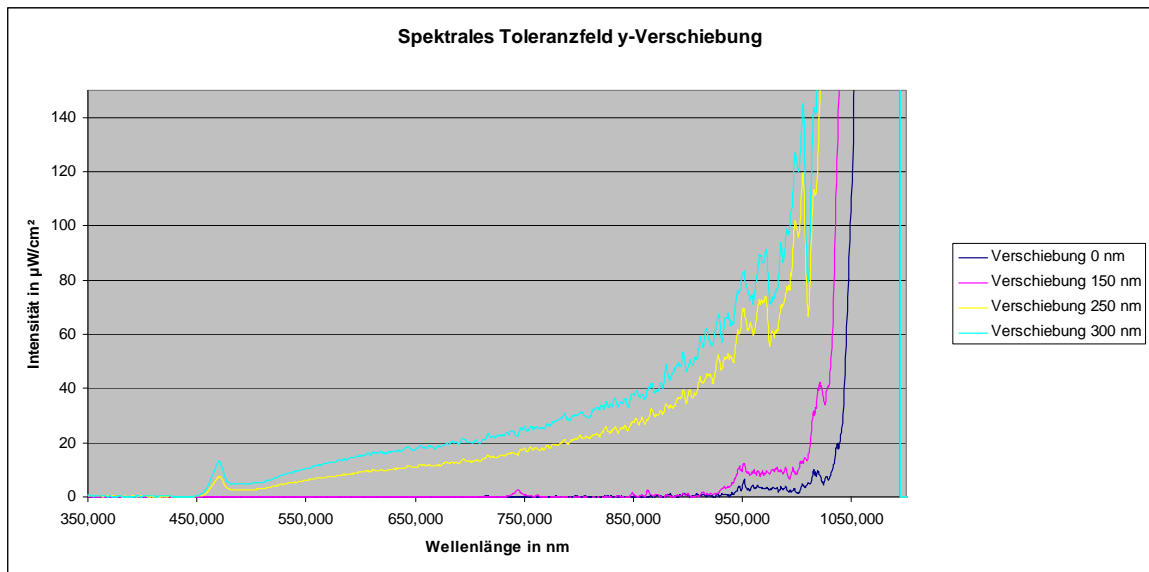


Abb. 21 Ergebnis der Toleranzfeldmessung für y-Verschiebung

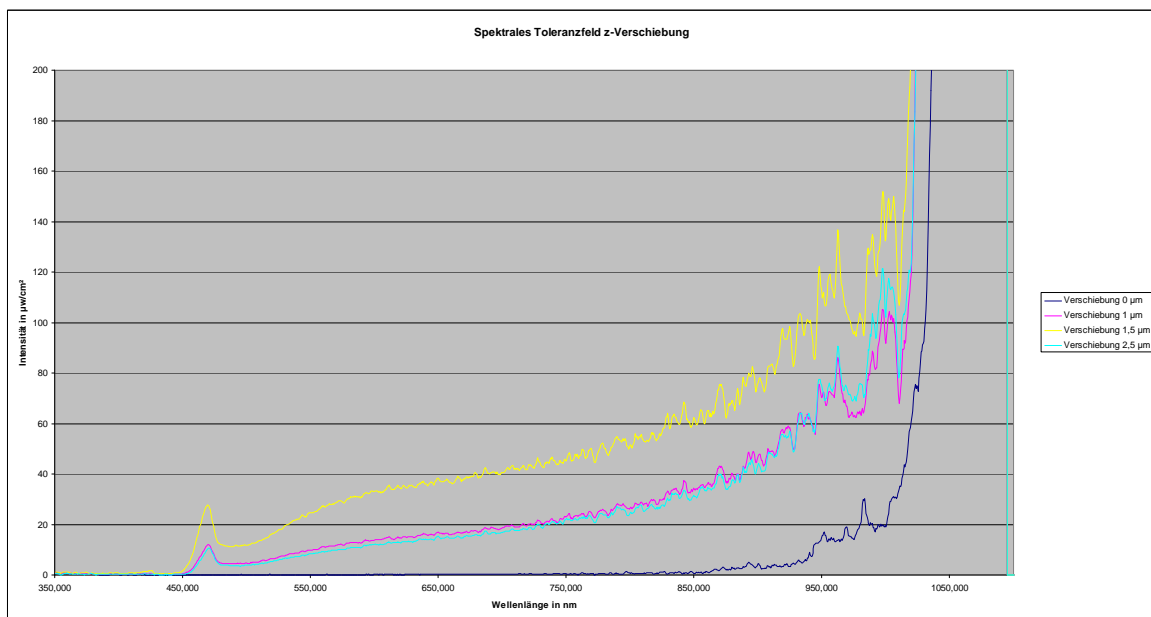


Abb. 22 Ergebnis der Toleranzfeldmessung für z-Verschiebung

Um Aussagen über den Leistungsverlust in der Faser bei Verschiebung zur Optik zu erhalten, wurden für jede Verschiebung die Intensitätswerte jeder Wellenlänge addiert und die Summen normiert. Aus diesen Diagrammen lässt sich nun ablesen, wie groß der Leistungsabfall bei entsprechender Verschiebung ist.

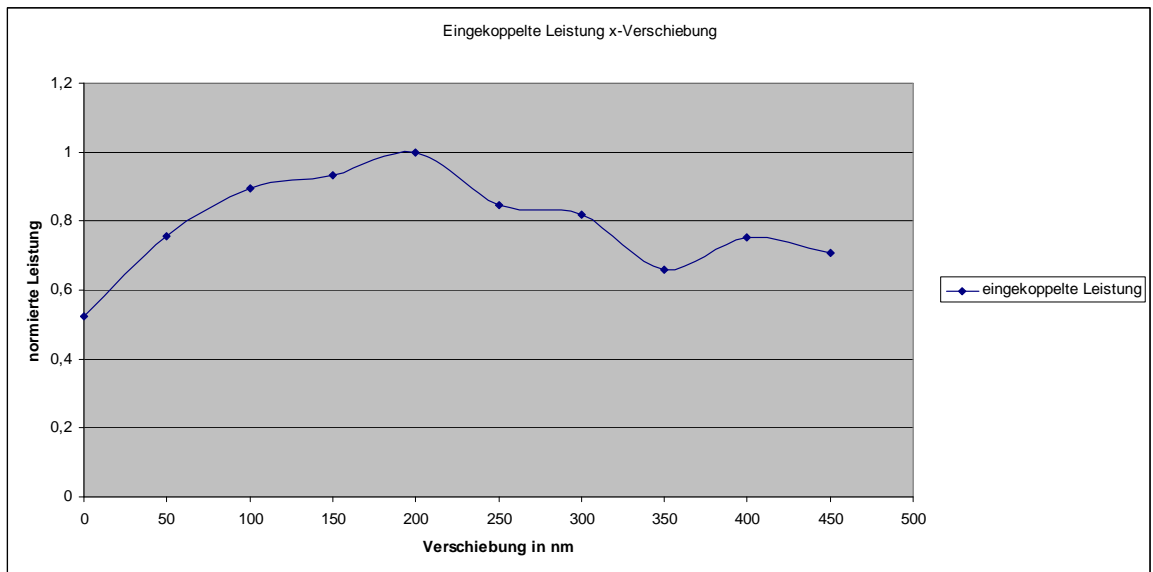


Abb. 23 Eingekoppelte Leistung für x-Verschiebung

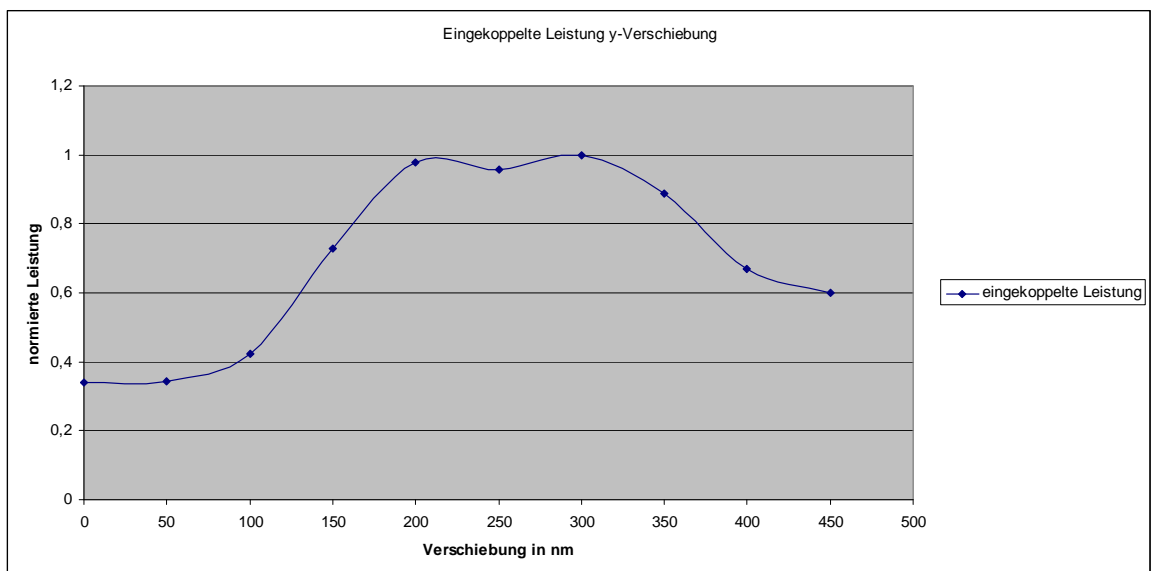


Abb. 24 Eingekoppelte Leistung für y-Verschiebung

Für die radiale Empfindlichkeit ergibt sich im Mittel eine Verschiebung von ca. $0,2\mu\text{m}$ nach der die eingekoppelte Leistung um 50% abgefallen ist.

Die unter 2.1.1 errechnete Toleranz des Versatzes für eine ideale Einkopplung ist um eine Größenordnung geringer als die hier gemessene. Dies ist durch die nicht ideale Einkopplung im Messaufbau zu erklären.

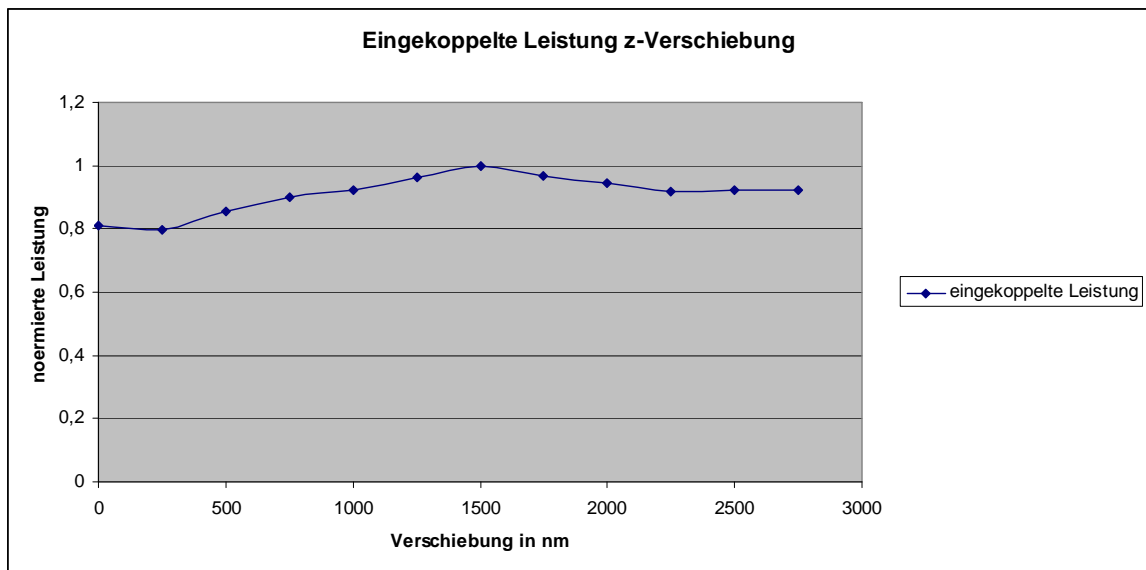


Abb. 25 Eingekoppelte Leistung für z-Verschiebung

Für die laterale Empfindlichkeit ergibt sich eine Verschiebung von ca. $1,5\mu\text{m}$, nach der die eingekoppelte Leistung auf 80% abgefallen ist.

5 Faserintegrierte Optik

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der faserintegrierten Optik beschrieben. Es werden die Berechnungen aufgeführt, welche Grundlage für Design und Dimensionierung der Optik sind und die Fertigung der Optik erläutert.

5.1 Design der faserintegrierten Optik

Bei dem hier vorliegenden Problem liegt es nahe, die nötigen Berechnungen durch eine Simulationssoftware durchführen zu lassen, damit ein sehr gut angepasstes Rechenmodell verwendet werden kann. Bei genauerer Betrachtung übersteigt diese Methode aber die normalen Grenzen der Technik um ein Vielfaches.

Die zwei gängigsten Methoden, Finite-Elemente-Methode (FEM) und Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich (FDTD), benötigen, um realitätsnahe Ergebnisse zu berechnen, aus der Erfahrung heraus³ Elementgrößen des Berechnungsnetzes von etwa zehn Elementen pro Wellenlänge.

Das hier vorliegende Problem hat, selbst auf eine Ebene minimiert und im 2D Modus betrachtet, von Natur aus schon eine Ausdehnung von einigen Quadratmillimetern, so dass die Elementanzahl und damit die Anzahl der zu lösenden Gleichungen im System eine nicht mehr zu bewältigende Menge darstellen.

Aus diesem Grund werden im Folgenden andere Herangehensweisen vorgestellt, um die passende Geometrie der Optik zu berechnen.

³ Ergebnisse der Diplomarbeit „Design von Photonischen Kristallfasern“ von Dipl. Ing. Torsten Hähnel, Mittweida 2006

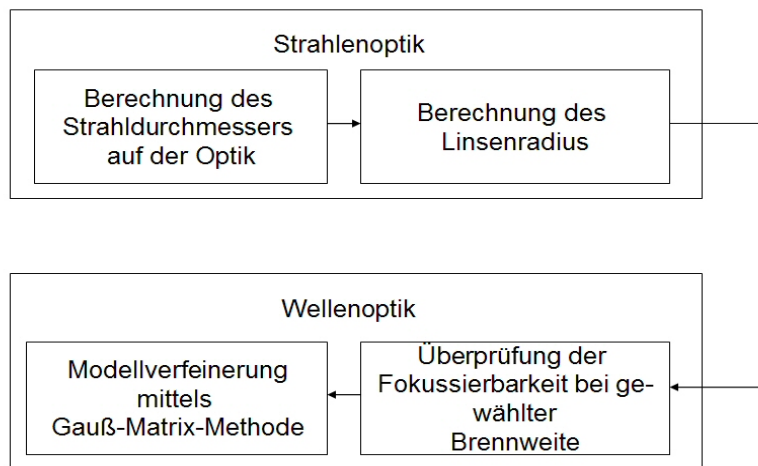


Abb. 26 Vorgehensweise bei der Berechnung

5.1.1 Entwurf mittels Strahlenoptik

Um einen ersten Eindruck der Dimensionen zu erhalten, wurde die Optik im ersten Arbeitsgang mit einfacher geometrischer Strahlenoptik, der das Snelliussches Brechungsgesetz zu Grunde liegt, berechnet.

Es wird im Folgenden die geringe Ovalität des Laserstrahls vernachlässigt und nur noch mit den Werten der horizontalen Strahlebene gerechnet. Um einige Rechnungen weiter zu vereinfachen, wird der Strahl kurz vor der Linse als parallel angesehen. Um definierte Strahleigenschaften für die Rechnung zu erhalten, wurde der Abstand des Lasers zur Grenzfläche der Optik auf einen Zentimeter festgelegt. Für den Strahldurchmesser D an der Optik ergibt sich durch Strahlverlängerung für die gegebene Divergenz und den Abstand vom Laser der Wert

$$D = 450\mu\text{m}.$$

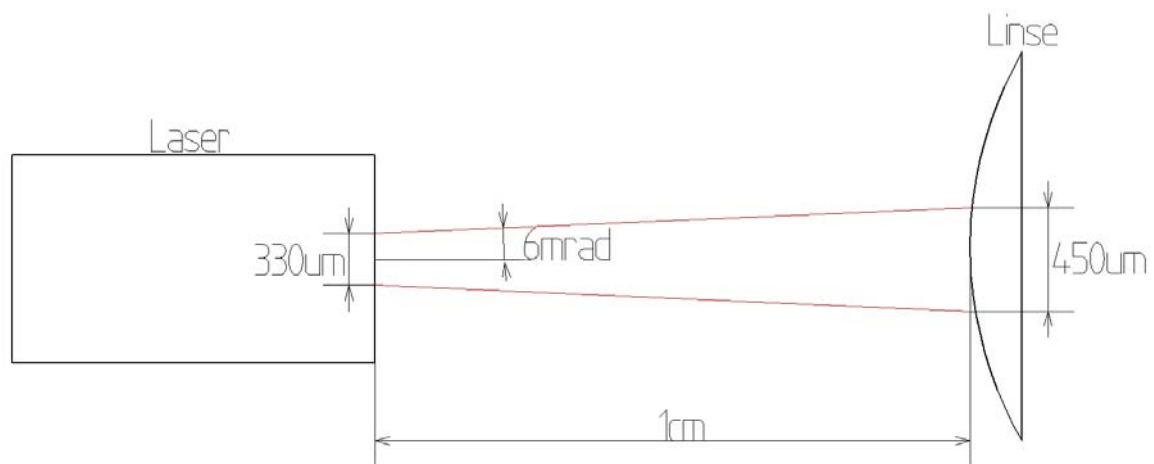


Abb. 27 Schematische Darstellung der strahlenoptischen Betrachtung

In einem ersten Schritt wurde der Linsenradius über das lineare Brechungsgesetz rein geometrisch ermittelt.

Hierzu wurde mit dem Programm SolidWorks eine interaktive Skizze erzeugt. Das Snelliussches Brechungsgesetz wurde nach dem Brechungswinkel β umgestellt und somit mit der festen, vom Laser vorgegebenen, Größe α verknüpft.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin(\alpha)}{n_2}\right)$$

Der Radius der Linse wurde in dieser Skizze so lang verändert ,bis der Schnittpunkt des gebrochenen Strahls mit der optischen Achse und dem Brennpunkt der Linse deckungsgleich waren. Die Brennweite der Linse von ca. 1,5mm wurde in diesem Entwurf frei gewählt, um die Optik für die weiteren Produktionsschritte in einer handhabbaren Größe zu gestalten.

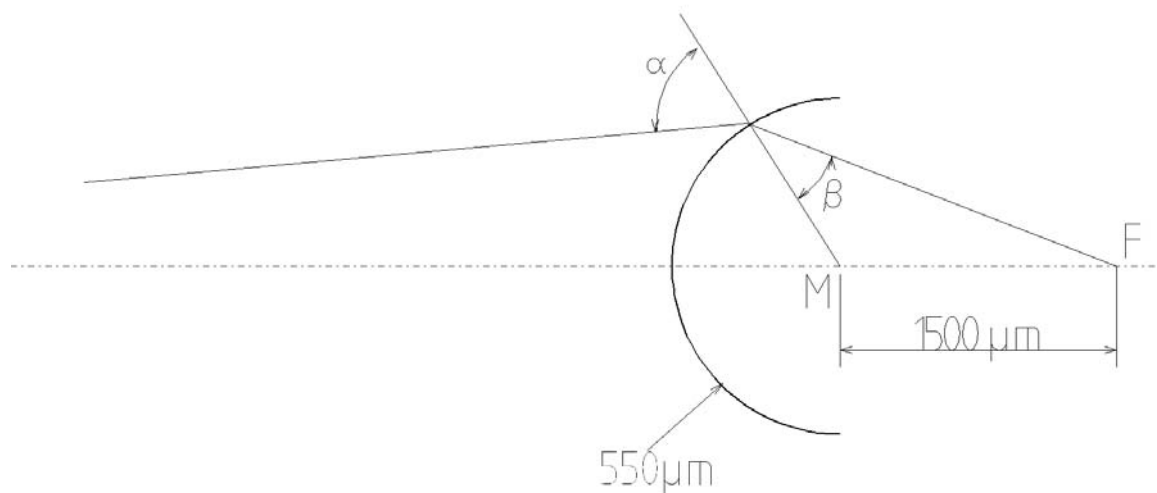


Abb. 28 Skizze zur Berechnung des Linsenradius

Es ergibt sich ein Wert für den Linsenradius von:

$$R = 550\mu m$$

Um zu überprüfen, ob mit der gewählten Brennweite die Fokussierung auf den gewünschten Durchmesser überhaupt zu realisieren ist, wurde die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls wellenoptisch überprüft.

Die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls lässt sich mit Hilfe von

$$\omega_{fokus} = \frac{f * \lambda}{\pi * \omega_{Rohstrahl}}$$

mit ω_{fokus} - Fokusradius

$\omega_{Rohstrahl}$ - Rohstrahlradius

[7, 6.12]

errechnen.

Für die gewählten Parameter ergibt sich ein Fokustailenradius von

$$\omega_{Fokus} = 2,25\mu m.$$

Mit der frei gewählten Brennweite der Optik ist es möglich in den Kern der Photonischen Kristall-Faser einzukoppeln.

Der Wert des Linsenradius wird im Folgenden als Richtwert für die kommenden Rechnungen verwendet.

Da in der Fertigung die exakte Messung der Brennweite schlecht zu realisieren ist, wird für die praktische Umsetzung die Schnittweite der Optik verwendet, welche die Entfernung der sphärischen Grenzfläche zum Brennpunkt angibt und aus der Summe von Brennweite und Radius der Linse zu errechnen ist.

Diese ergibt sich bei der strahlenoptischen Rechnung zu

$$s = 2050\mu m$$

Um diese Ergebnisse zu verfeinern, werden in einem weiteren Schritt die Ausbreitung von Gaußstrahlen und die Matrixmethode miteinander verknüpft.

5.1.2 Matrixmethode (Gaußoptik)

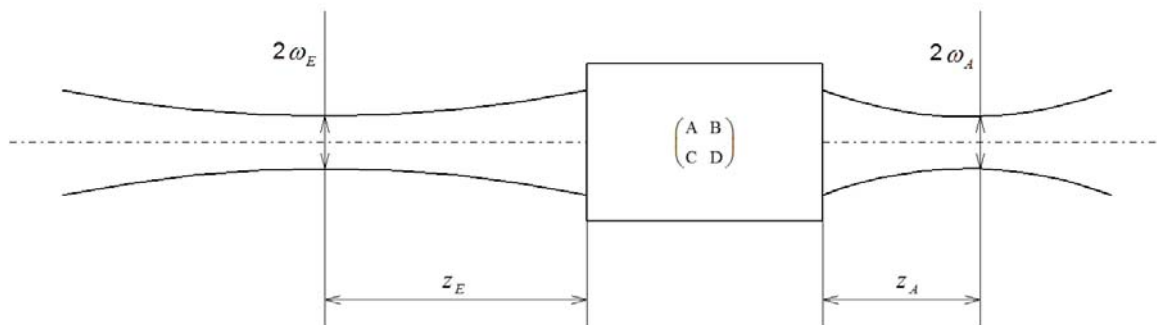


Abb. 29 Strahlengang durch ein lineares opt. System

Die Kombination von Ausbreitung der Gaußstrahlen mit der Matrixmethode erlaubt die Parametrisierung eines durch ein lineares optisches System transformierten Strahls, solange der Ausgangsstrahl bekannt ist.

Dazu wird zuerst der komplexe Strahlparameter gebildet, welcher einen Gaußstrahl komplett beschreibt.

$$q(z) = z + i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} = z + i z_c \quad [4; 2.3]$$

mit z – Abstand der Strahlteile zum opt. System

z_c - Rayleighlänge

ω_0 - Strahltaillenradius

λ - Wellenlänge

Die Transformationsmatrix für eine sphärische Grenzfläche lautet:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad [4; 2.10]$$

Zur Bestimmung der Brennweite und der Fokustaille wird der zuvor ermittelte Linsenradius von $550\mu\text{m}$ als feste Größe eingesetzt.

Quantitativ gilt:

$$q_A = \frac{Aq_E + B}{Cq_E + D} \quad [4; 2.19]$$

Somit ergibt sich für q_A :

$$q_A = \frac{A(z_E + iz_{cE}) + B}{C(z_E + iz_{cE}) + D} = \frac{z_E + iz_{cE}}{\frac{n_1}{n_2} + \frac{(n_1 - n_2)(z_E + iz_{cE})}{n_2 R}}$$

Real- und Imaginärteil des so errechneten Strahlparameters ergeben die gesuchten Größen.

$$\Re(q_A) = z_A = \frac{n_2 R (n_1 z_E R + (n_1 - n_2)(z_E^2 + z_{cE}^2))}{n_1^2 R^2 + 2n_1(n_1 - n_2)z_E R + (n_1 - n_1)^2(z_E^2 + z_{cE}^2)}$$

$$\Im(q_A) = z_{cA} = \frac{n_1 n_2 z_{cE} R^2}{n_1^2 R^2 + 2n_1(n_1 - n_2)z_E R + (n_1 - n_1)^2(z_E^2 + z_{cE}^2)}$$

Der Realteil ergibt direkt den Abstand der sich ergebenden Fokustaille von der sphärischen Grenzfläche.

Der Imaginärteil kann einfach nach dem Fokusradius ω_0 aufgelöst werden:

$$\Im(q_A) = z_{cA} = \frac{\pi \omega_{0A}^2}{\lambda} = \frac{n_1 n_2 z_{cE} R^2}{n_1^2 R^2 + 2n_1(n_1 - n_2)z_E R + (n_1 - n_1)^2(z_E^2 + z_{cE}^2)}$$

$$\omega_{0A} = \sqrt{\frac{n_1 n_2 z_{cE} R^2 \lambda}{(n_1^2 R^2 + 2n_1(n_1 - n_2)z_E R + (n_1 - n_1)^2(z_E^2 + z_{cE}^2))\pi}}$$

Unter Einberechnung des gegebenen Strahlparameterproduktes M^2 von 1,35 und dem Linsenradius von $R = 550\mu m$ ergeben sich für den verwendeten Laser somit folgende Werte für die faserintegrierte Linse:

$$z_A = s = 1836,44\mu m$$

$$\omega_{0A} = 2,224\mu m$$

5.2 Ergebnisse der Berechnungen und Auswertung

Es ist zu erkennen, dass für den unter 5.1.1 berechneten Wert für den Linsenradius von $550\mu m$ der geforderte Fokusbereich von $d_{fok} \leq MFD = 4,5\mu m$ eingehalten wird und somit theoretisch sehr gute Koppelgrade zu erwarten sind.

Die zur Vereinfachung der Rechnung vernachlässigte Ovalität des Laserstrahls wird sich in einer Verschlechterung dieses Koppelgrades auswirken. Diese Verschlechterung, welche in der Praxis durch die sphärische Linsenform verursacht wird, wird zu Gunsten der Fertigbarkeit eines Prototypen toleriert. Fertigungstoleranzen werden auf Grund der unter 4.1 gezeigten sehr geringen Koppeltoleranzen auch bei der faserintegrierten Linse zu Verschlechterungen des Koppelgrades führen.

5.3 Fertigung der faserintegrierten Optik

Zur praktischen Überprüfung der unter 5.1.2 ermittelten Werte wurde ein erster Prototyp hergestellt. Hierzu wurde eine dickwandige Kapillare mit einem Innendurchmesser von $130\mu\text{m}$ und einem Außendurchmesser von $1000\mu\text{m}$ gefertigt.

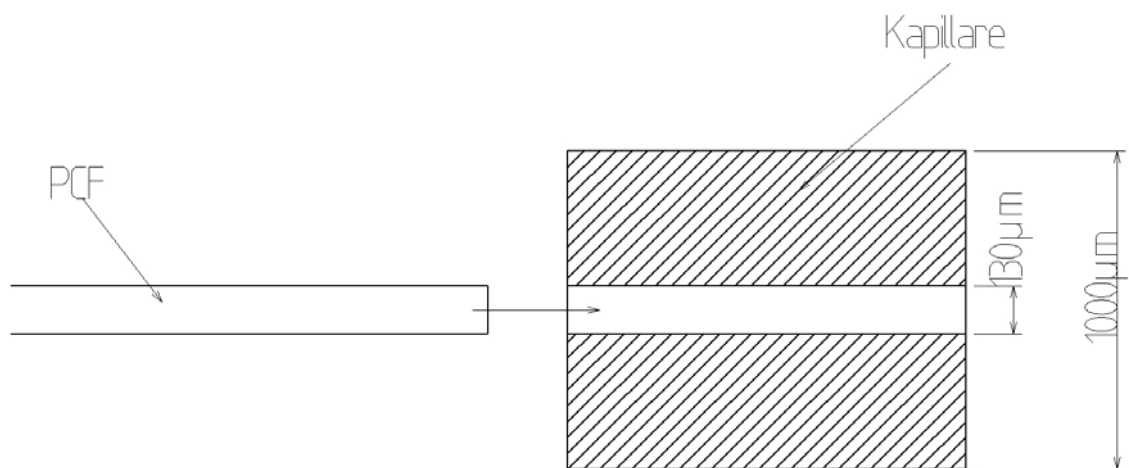


Abb. 30 Schematische Darstellung der PCF und Kapillare vor dem Verschmelzungsprozess

Die PCF wurde in die Kapillare eingeföhrt und mittels Plasmabogen verschmolzen.

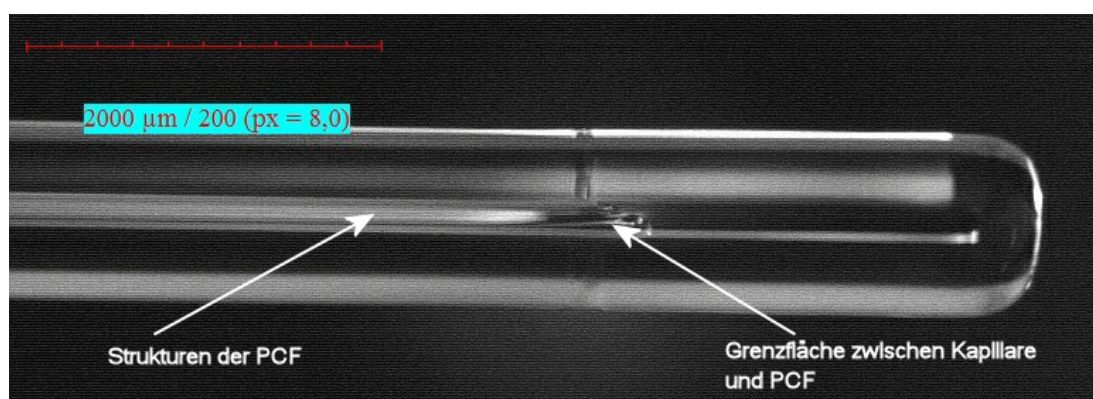


Abb. 31 Verschmelzung ohne Unterdruck

Es ist zu erkennen, dass die Strukturen der PCF weiter zurückkollabieren als die PCF selbst mit der Kapillare verschmilzt. Somit würden den Strahlengang störende Grenzflächen im Linsenkörper zurück bleiben.

Um dieses Problem zu lösen und eine gute Verschmelzung von PCF und Kapillare zu gewährleisten, wurde mittels einer extra für diesen Zweck entworfenen Halterung Unterdruck zwischen PCF und Kapillare erzeugt.

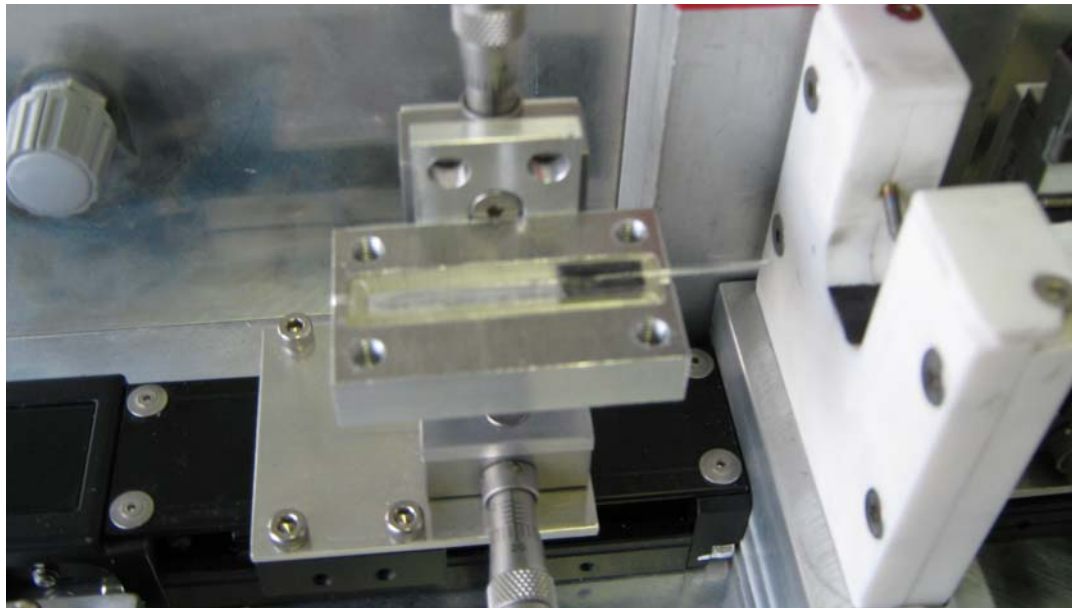


Abb. 32 Halterung offen mit eingelegter Kapillare und Faser

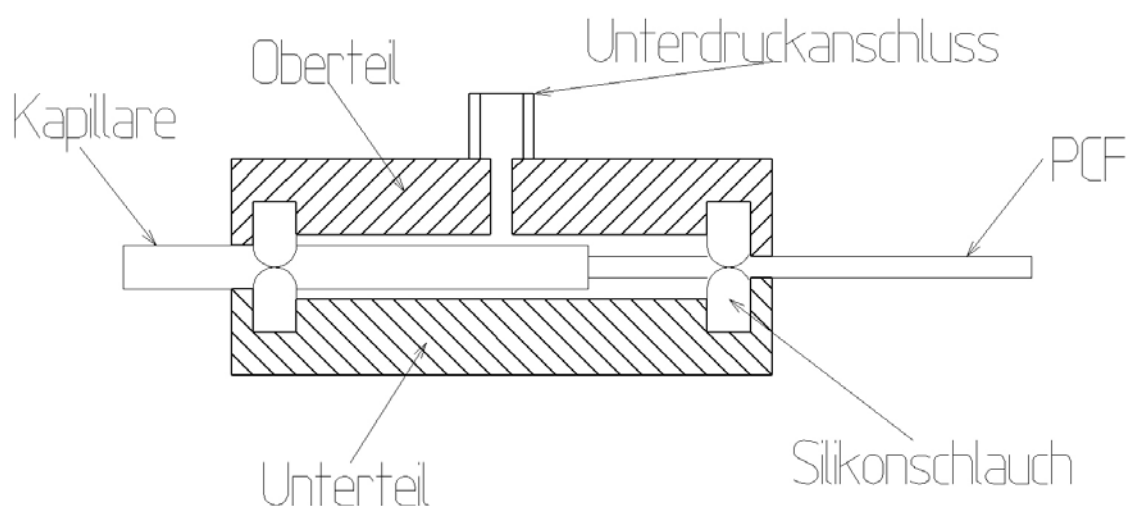


Abb. 33 Skizze der Faserhalterung mit Unterdruckanschluss

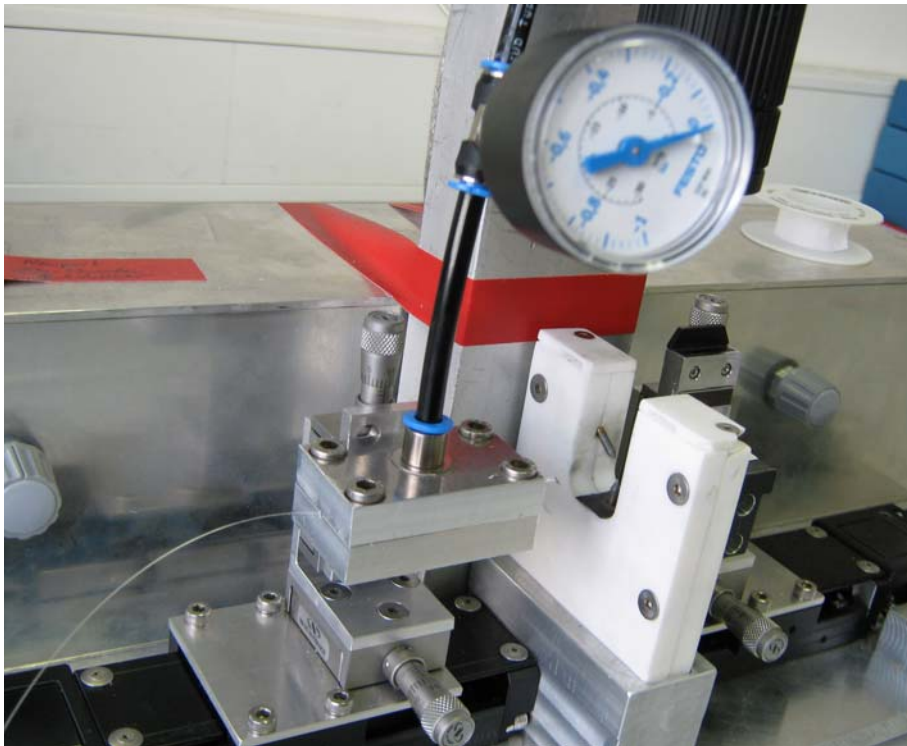


Abb. 34 Geschlossene Halterung mit eingelegter Faser und Unterdruckanschluss an der Plasma-Splice-Station

Die Halterung besteht aus Ober- und Unterteil, wobei letzteres gleichzeitig die Befestigung am x-y-Versteller darstellt. Das Oberteil fungiert als Klemmvorrichtung für die Faser und beinhaltet den Anschluss für die Vakuumpumpe. Darüber hinaus erleichtert die zweigeteilte Halterung das Einlegen und Klemmen der, in diesem Stadium der Fertigung, äußerst empfindlichen Optik.

Die Dichtung wurde aus einem sehr weichen Silikonschlauch gefertigt, um auch hier einer Zerstörung der Verbindung vorzubeugen. Beidseitig besitzt die Halterung eine V-Nut, um einerseits die korrekte Ausrichtung der Kapillare zum Plasmabogen zu gewährleisten, andererseits beim Klemmen Faser und Kapillare nicht zu zerstören.

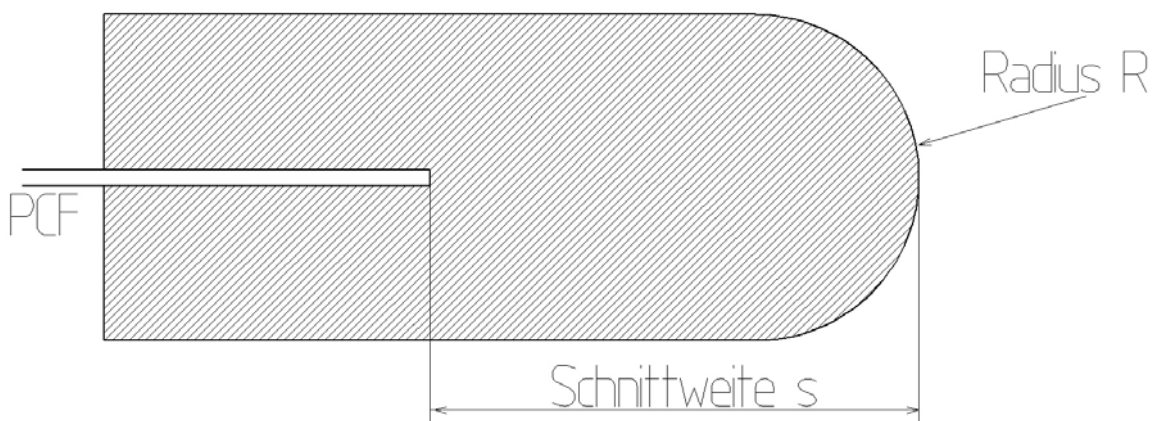


Abb. 35 Skizze der Verschmolzenen Optik

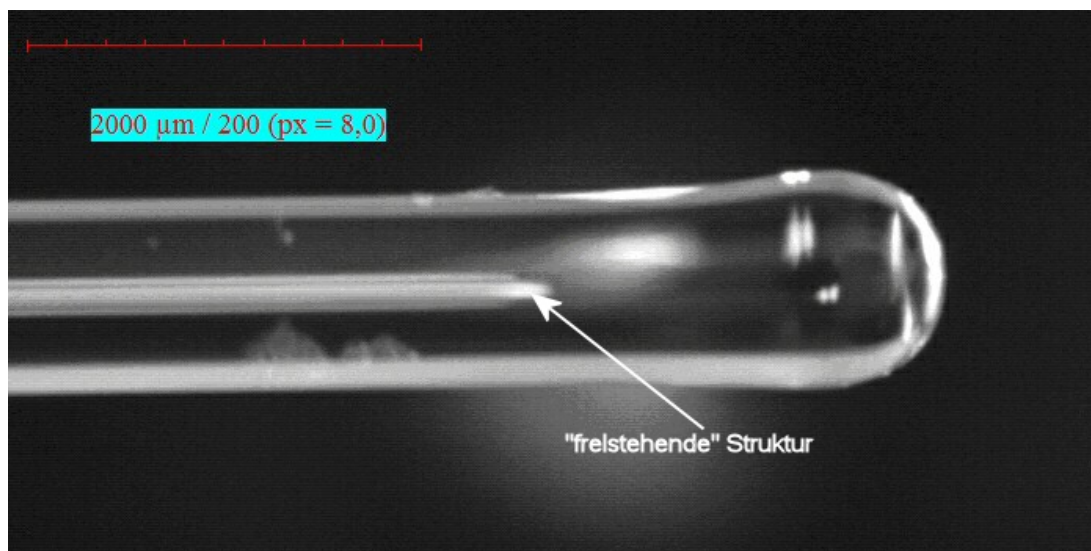


Abb. 36 Erster Schmelzversuch mit Unterdruck

Es ist in Abb. 36 zu erkennen, dass die Verschmelzung von PCF und Kapillare durch den angelegten Unterdruck von ca. 0,4 bar signifikant verbessert werden konnte. Die Strukturen der PCF „stehen“ nun frei im Linsenkörper, und der Strahl kann ohne störende Grenzflächen in diese eingekoppelt werden.

Durch die Position der so gefertigten Optik im Plasmabogen können die Strukturen auf ein beliebiges Maß zurückgeschmolzen werden.

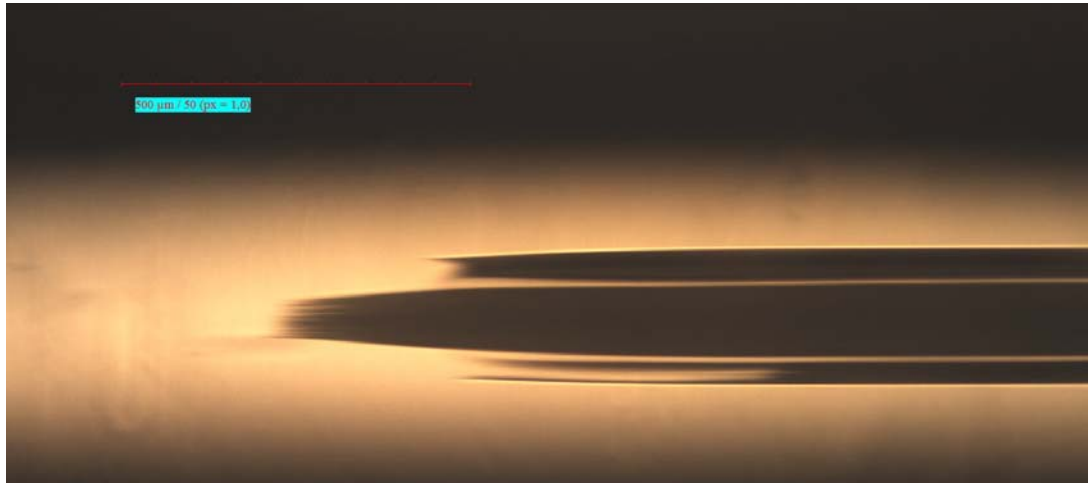


Abb. 37 Kollabierte Strukturen unter dem Durchlichtmikroskop

Um die Stabilität der so gefertigten Rohlinsen nach dem Verschmelzungsprozess zu gewährleisten, wird direkt im Anschluss ein sehr dünnflüssiger, unter UV Strahlung aushärtender, Klebstoff auf die Verbindungsstelle von Kapillare und PCF aufgetragen. Die beim Schmelzprozess im Raum zwischen Kapillare und PCF befindliche Restluft zieht sich beim Abkühlen der Linse wieder zusammen und zieht den Klebstoff zum Teil in diesen Zwischenraum. Nach dem Aushärten des Klebers ist somit eine ausreichend stabile Verbindung an dieser, für Knickung sonst sehr empfindlichen, Stelle gewährleistet.

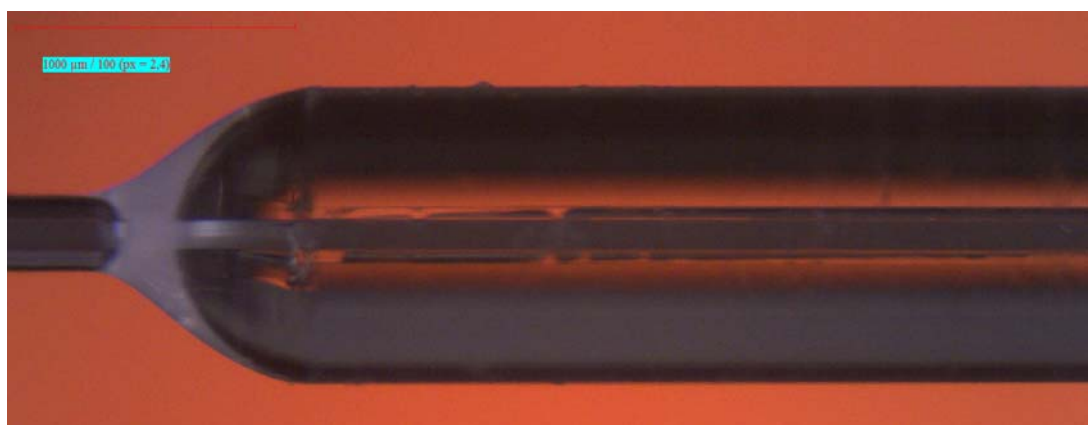


Abb. 38 Klebstelle von Faser und Kapillare unter dem Durchlichtmikroskop

Im nächsten Schritt werden die Rohlinsen unter Zuhilfenahme eines Mikroskops und elektronischer Messsoftware plan auf das Maß der unter 5.1.2 errechneten Schnittweite geschliffen. Anschließend wird der berechnete Linsenradius von einer externen Firma mit einem neuartigen, noch nicht vollständig ausgereiften Verfahren mittels CO_2 -Laser ablatiert. Die Rohlinse wird dabei in einer Halterung um die optische Achse rotiert und in einer Ebene geschwenkt. Die Einhaltung der Maße wird interferometrisch überwacht.

6 Vermessung der faserintegrierten Optik

Zuerst wurden die fertigen Optiken mittels Mikroskop und Vermessungssoftware auf die geometrischen Maße hin untersucht.

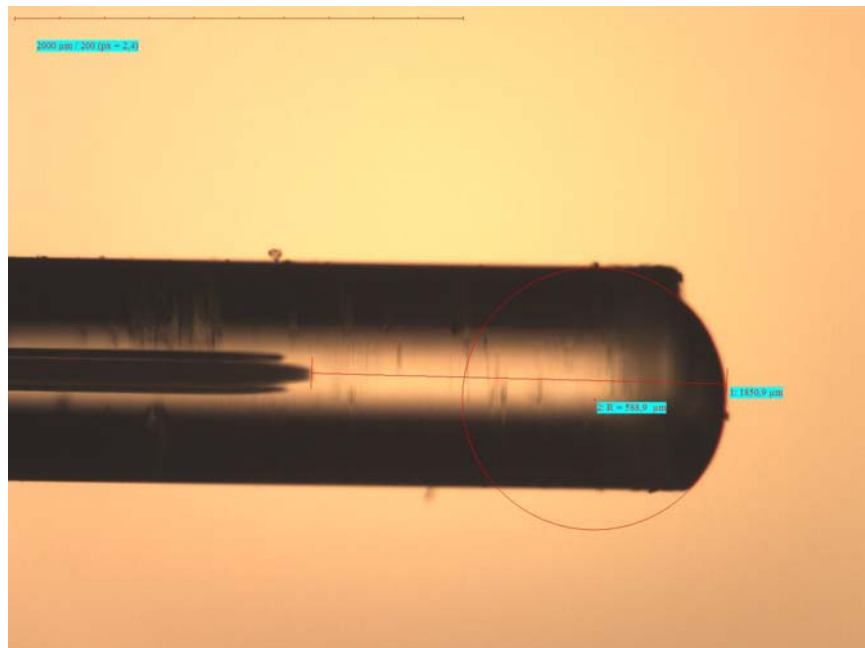


Abb. 39 Optik Nr.1 unter dem Durchlichtmikroskop

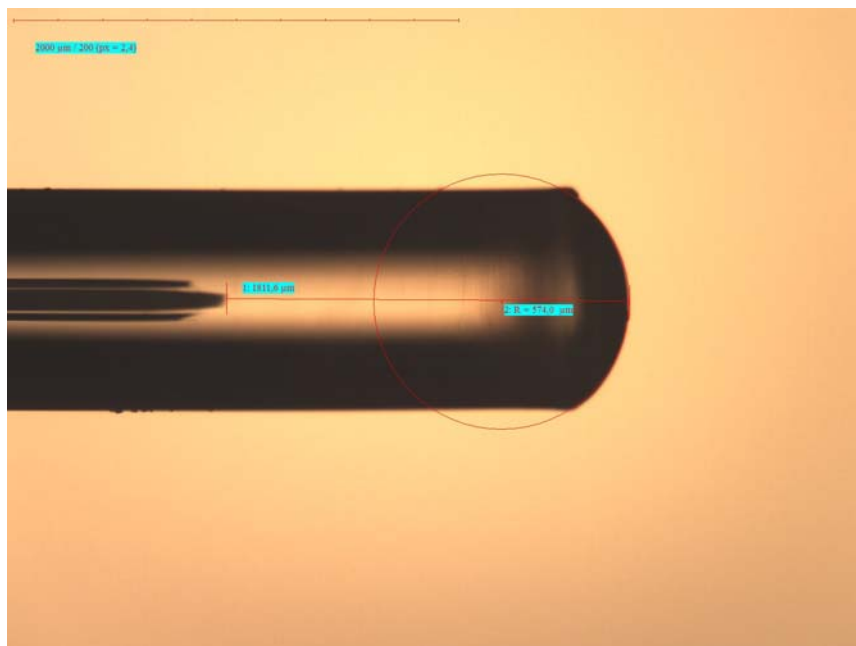


Abb. 40 Optik Nr.6 unter dem Durchlichtmikroskop

Es ist zu erkennen, dass Fertigungsfehler in diesem Stadium der Entwicklung nicht auszuschließen sind. Dies resultiert direkt aus dem Entwicklungsstand der Ablationsstation. Die Optiken 1-5 wiesen nahezu die gleichen Fertigungsfehler, Toleranzen und Messergebnisse auf, so dass im Folgenden die Messergebnisse von Optik 1 stellvertretend für die Optiken 1-5 ausgewertet werden.

In Abb. 39 ist zu erkennen, dass hier die Optik außermittig in der Halterung eingespannt wurde und somit die eigentliche Linse außerhalb der optischen Achse ablatiert wurde. Die Optiken 1-5 wurden trotz der gravierenden Fertigungsmängel Einkoppelversuchen unterzogen.

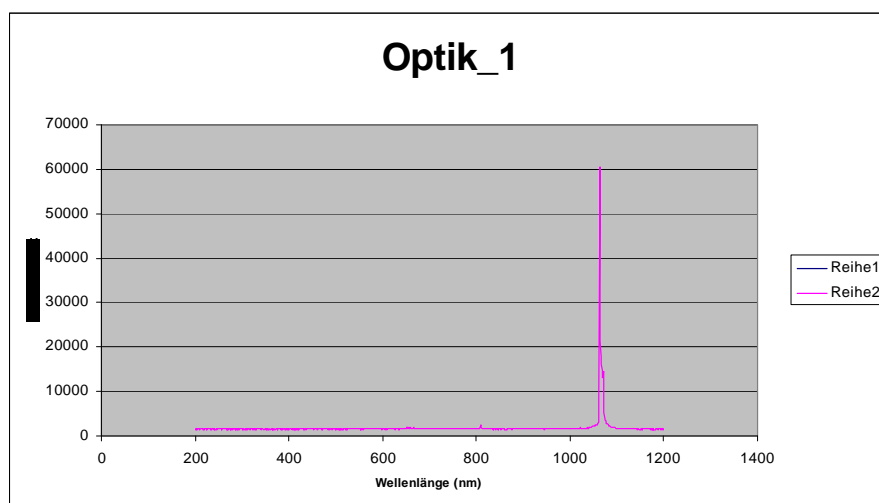


Abb. 41 Spektrometrische Messung am Faserende bei Einkopplung mittels Optik_1, Faserlänge 1,5m

Wie zu erwarten, konnte mittels Spektrometer hier keine erzeugte Strahlung in den Fasern gemessen werden, was auf eine zu geringe Intensität im Kern auf Grund der schlechten Kopplung schließen lässt.

Optik 6 wies außer den Abweichungen von den berechneten Werten keine gravierenden Fertigungsfehler auf. Die Linse wurde mittig auf der Stirnfläche der Rohlinse ablatiert. Allerdings lassen die geometrischen Werte darauf schließen, dass die Brennweite dieser Optik länger als die errechnete ist und somit nicht nur in den Kern, sondern auch in die Strukturen eingekoppelt wird. Wie Abbildung 42 zeigt, konnte bei der Untersuchung schon ein Spektrum, welches in der Faser erzeugt wurde, nachgewiesen werden, was auf eine gewisse Leistungsdichte im Kern der Faser schließen lässt.

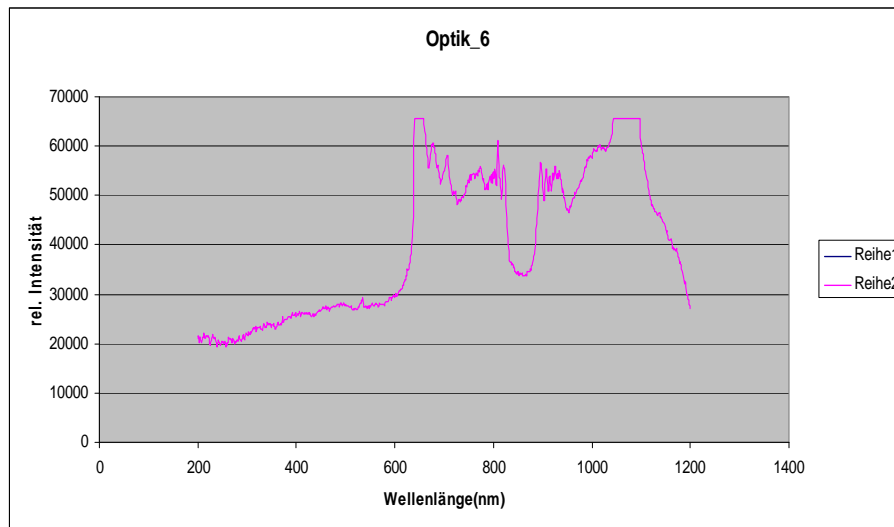


Abb. 42 Erzeugtes Spektrum am Faserende bei Einkopplung mittels Optik 6, Faserlänge 1,5m

Das in Abb. 43 gezeigte Strahlprofil am Ende der Faser von Optik 6 bestätigt die Annahme, dass auch in die Strukturen eingekoppelt wurde. Es ist einzig das Profil der Strahlung zu erkennen, welche in den Strukturen geführt wird. Die im Kern geführte Strahlung wird auf Grund der geringen Intensität davon völlig überlagert. Darüber hinaus entstehen Speckel auf der Sensoroberfläche der Kamera, welche weiterhin das Strahlbild verfälschen.

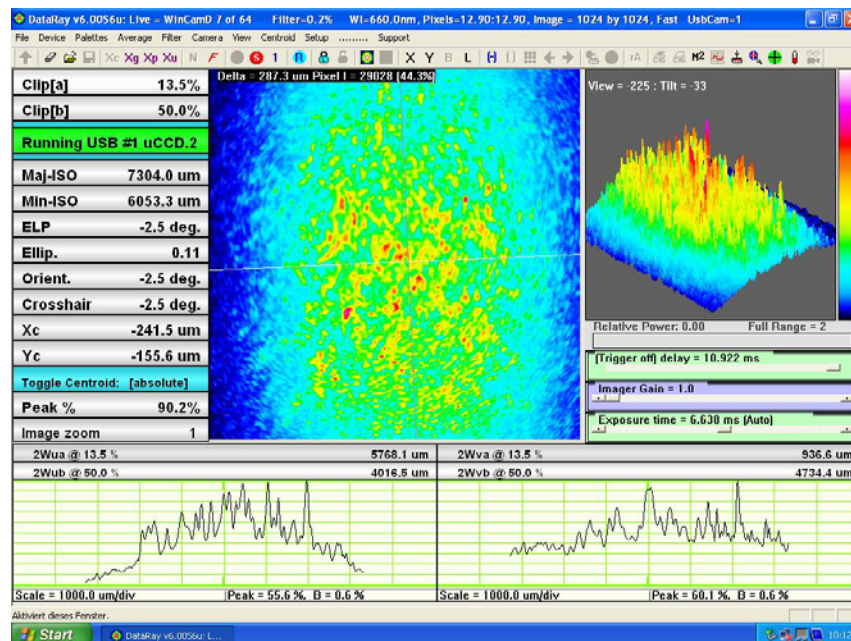


Abb. 43 Aufnahme des Strahlprofils am Faserende bei Einkopplung mit Optik 6

6.1 Rechnerische Aufbereitung der Messwerte

Wegen der geringen Anzahl an Messergebnissen, und da auch hier die transmittierte Leistung keine Schlussfolgerung über den Koppelgrad liefert, werden die Messergebnisse rechnerisch aufgearbeitet, um zumindest in der Größenordnung eine Aussage zur Koppleffizienz der fasernintegrierten Linse zu erhalten.

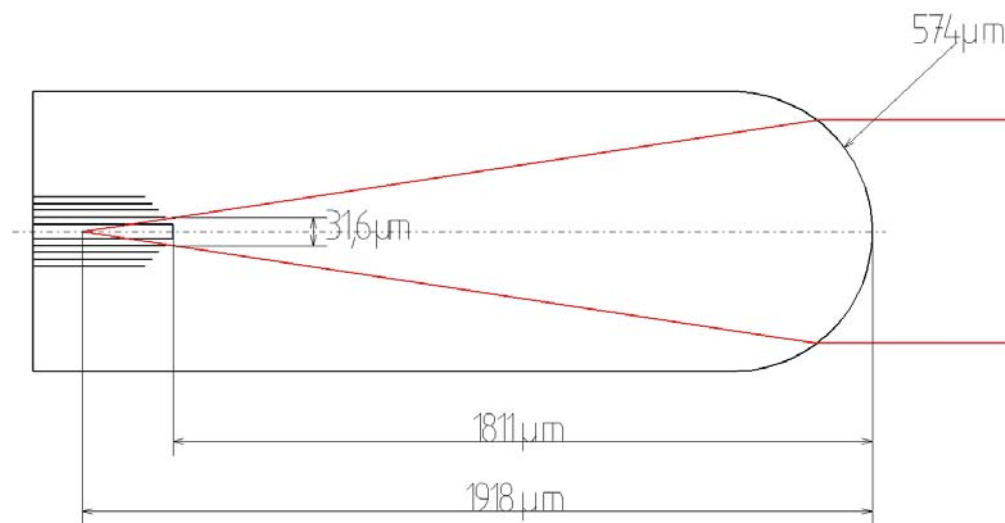


Abb. 44 Skizze von Optik 6 mit theoretischem Strahlengang

Die theoretische Schnittweite der Optik mit einem Linsenradius von $574\mu\text{m}$ beträgt

$1918\mu\text{m}$.

Der Fokustailenradius beträgt

$2,33\mu\text{m}$.

Gerechnet wurde analog zu 5.1.2

Die reale Schnittweite der Optik beträgt

$1811\mu\text{m}$.

Somit ergibt sich eine Differenz von

$$107\mu\text{m}.$$

Über

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot \omega_0^2} \right)^2}$$

mit ω_0 - Tailenradius

λ - Wellenlänge

$\omega(z)$ - Fleckradius an der Stelle z

[7, 6.1]

kann der Fleckradius am eigentlichen Einkoppelpunkt, d.h. an der Stelle der kollabierten Strukturen, errechnet werden und ergibt sich bei gegebenen Werten zu

$$\omega(107\mu\text{m}) = 15,8\mu\text{m}.$$

Bei angenommenen kreisförmigen Strahlfleck ergibt sich ein Fläche von

$$A_{\text{Strahl}} = 780,2\mu\text{m}^2$$

Dem gegenüber stehen $15,9\mu\text{m}^2$ Kernfläche, in die eingekoppelt werden soll.

Durch das Gaußprofil des Lasers befindet sich aber der Großteil der Leistung zentrumsnah im Stahl.

Die Integration solcher Gaußkurven in den Grenzen der unterschiedlichen Fleckradien und deren Vergleich ergeben die Verhältnisse der Flächen unter der Kurve und damit die Leistung, welche theoretisch in den Kern der PCF unter Verwendung von Optik 6 eingekoppelt wird.

Die Funktion einer Gaußkurve lautet:

$$E_s = E_0 \cdot e^{\left(\frac{-r^2}{d_0^2}\right)} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} E_s - \text{radiale Leistungsverteilung} \\ E_0 - \text{Ausgangsleistung} \\ d_0 - \text{Fleckdurchmesser} \\ r - \text{Radius} \end{array} \quad [7, 4.32]$$

$$\frac{\int_{-2.25}^{2.25} e^{\left(\frac{-r^2}{d_0^2}\right)} dr}{\int_{-15.8}^{15.8} e^{\left(\frac{-r^2}{d_0^2}\right)} dr} = 0,1545$$

Es werden also mit Optik 6 theoretisch rund 15,5% der Laserstrahlung in den Kern eingekoppelt. Diese Aussage klingt plausibel, da mit der spektrometrischen Messung zwar eine gewisse erzeugte Strahlung nachgewiesen werden konnte, die Intensität jedoch nur sehr gering war.

Aus dieser Rechnung lassen sich die Fertigungstoleranzen errechnen, welche für eine Einkopplung mit mindestens 70% Wirkungsgrad notwendig sind.

$$\frac{\int_{-2.25}^{2.25} e^{\left(\frac{-r^2}{d_0^2}\right)} dr}{\int_{-\frac{\omega_0}{2}}^{\frac{\omega_0}{2}} e^{\left(\frac{-r^2}{d_0^2}\right)} dr} \geq 0,7$$

Nach obiger Formel benötigt man für eine theoretische Einkopplung von 72% einen Fleckdurchmesser an der Stelle der kollabierten Strukturen von maximal

$$d_0 = 6,5 \mu m .$$

Die Formel

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot \omega_0^2} \right)^2}$$

nach z umgestellt und gegebene Werte eingesetzt ergibt einen Abstand z von

$$z = 15,6 \mu m$$

Hieraus ergibt sich direkt die Fertigungstoleranz der Schnittweite

$$S = 1836 \mu m \pm 15,6 \mu m$$

Analog zu 5.1.2 können nun die Radien errechnet werden, bei denen die Brennpunktverschiebung ebenfalls $15,6 \mu m$ beträgt.

$$R(\Delta S = -15,6 \mu m) = 545,5 \mu m$$

$$R(\Delta S = +15,6 \mu m) = 554,5 \mu m$$

Es ergibt sich die Fertigungstoleranz des Radius von

$$R = 550 \mu m \pm 4,5 \mu m .$$

Da beide Fertigungstoleranzen direkten Einfluss auf den Koppelwirkungsgrad haben, können sie sich unter Umständen aufheben oder aber wie am Beispiel von Optik 6 auch verstärken.

7 Ausblick

Es war im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich, einen funktionierenden Prototypen herzustellen.

Es ist aber aus den Ergebnissen und deren Aufbereitung zu erkennen, dass die bisherige Entwicklung zu einem guten Ergebnis führen wird, sobald die fertigungstechnischen Probleme gelöst sind.

Eine Weiterführung dieses Projektes sollte vor allem die Weiterentwicklung der Technologien zur Fertigung der Linsen und die Optimierung bisheriger Abläufe beinhalten. Die erhaltenen Werte für die Fertigungstoleranzen stellen einen hohen technischen Anspruch an die Fertigung.

Sind die Probleme der Fertigungstoleranzen gelöst und können funktionierende fasernintegrierte Optiken reproduzierbar hergestellt werden, können in einem weiteren Entwicklungsschritt Optimierungen an der Linsenform vorgenommen werden, um eine bessere Anpassung des Laserstrahls an die Kernform der Faser zu erreichen.

Für die Entwicklung eines serienreifen Produktes muss weiterhin die Frage der mechanischen Befestigung geklärt werden. Deren Entwicklung wird maßgeblich die Güte der Einkopplung beeinflussen. Es müssen Toleranzfelder für die fasernintegrierten Optiken aufgenommen werden und entsprechend stabile mechanische Befestigungen entworfen werden.

8 Thesen

Es wurde die Einkopplung der Superkontinuum-Lichtquelle auf ihre Eigenschaften hin untersucht und ausgewertet.

Experimentell wurde eine Toleranzfeldmessung der Einkopplung vorgenommen.

Es wurde eine radiale Empfindlichkeit von ca. $0,2\mu\text{m}$ Verschiebung ermittelt, bei welcher der Einkoppelwirkungsgrad um 50% sank.

Die laterale Empfindlichkeit ergab sich zu ca. $1,5\mu\text{m}$ Verschiebung, bei welcher der Einkoppelwirkungsgrad auf 80% sank.

Es wurde eine faserintegrierte Optik als Ersatz für den kommerziellen Faserkoppler mittels Gaußoptik entworfen, berechnet und mit neuartigen Technologien gefertigt.

Die Entwicklung dieser Technologien beinhaltet eine Methode zur Verschmelzung einer Photonischen Kristall-Faser mit einer Kapillare.

Es wurden erste Prototypen der faserintegrierten Optik auf ihre Eigenschaften hin untersucht und ausgewertet.

Auf Grundlage der Messergebnisse wurden die Fertigungstoleranzen der faserintegrierten Optik errechnet.

Literatur

- [1] Produktbeschreibung SC-Quelle Firma Fiberware
- [2] Leitfaden Fiber Optic, Dr. Dieter Eberlein, Kapitel 3 Kopplung von optischen Komponenten, ISBN 3-00-015038-2, 1. Auflage 2005
- [3] Optische Nachrichtentechnik Teil II , H.G. Unger, 12.1.1 Berechnungen von Verbindungen, ISBN3-7785-0961-6
- [4] http://www.iapmw.unibe.ch/teaching/vorlesungen/submm_optik/Kapitel2.pdf
- [5] http://www.sukhamburg.de/download/lsk60sms_e.pdf
- [6] <http://www.highpak.com/fibre.html>
- [7] Strahlwerkzeug Laser, H. Hügel, ISBN 3-519-06134-1

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 08. 02. 2011

Matthias Rothe